IGM87RT-502-563-G
CNRC 27573

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHE DU CANADA

Institut de génie des matériaux

75, boul. de Mortagne

Boucherville (Québec) J4B 6Y4

ETUDE DES PERFORMANCES DE L'APPAREIL DE FLEXION DYNAMIQUE DMTA

par

Richard Dufour

Michel Dumoulin

Jean-Pierre Chalifoux

Mars 1987

RESUME

Ce document rapporte les résultats d'un travail réalisé dans le but de mieux connaître les limites d'utilisation de l'appareil de flexion dynamique DMTA *.

Dans une première partie, les conditions d'utilisation usuelles de l'appareil furent investiguées afin de déterminer l'importance de l'erreur sur les modules dynamiques et sur l'amortissement.

En seconde partie, le montage original fut modifié de façon à assurer une force uniforme de contact aux encastrements et constante tout au long de l'essai, comme suggéré dans le guide d'utilisation de l'appareil. Plusieurs essais ont été réalisés afin d'évaluer l'impact de ce changement sur les résultats.

En dernière partie, l'influence de trois des paramètres (déflexion, épaisseur et portée) pouvant avoir un effet sur la déformation maximale de l'échantillon a été étudié. Il en découle qu'il existe une région optimale d'opération de l'appareil pour laquelle l'irrégularité des signaux des modules dynamiques et de l'amortissement est minimal.

* Dynamic Mechanical Thermal Analyser

TABLE DES MATIERES

Page

RESUME i

LISTE DES TABLEAUX iv

LISTE DES FIGURES v

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS vi

INTRODUCTION 1

1 - LE DMTA - PRESENTATION 2

2 - ETUDE DES PERFORMANCES ACTUELLES 5

2.1 - Choix du matériau et des conditions expérimentales 5

2.2 - Tests réalisés 6

2.2.1 - Echantillons doublement vs. simplement encastrés 6

2.2.2 - Trois tests sur le même échantillon 8

2.2.3 - Trois tests sur des échantillons différents 11

3 - ETUDE SUR LE MODE DE SERRAGE 14

3.1 - Modifications apportées au montage 14

3.2 - Tests réalisés avec le système de serrage modifié 16

3.2.1 - Quatre tests sur des échantillons différents 16

3.2.2 - Trois tests sur un même échantillon sans démontage 19

4 - INFLUENCE DE LA DEFORMATION 22

4.1 - Etude théorique 22

4.2 - Procédure d'essais 27

4.3 - Résultats et analyse 30

CONCLUSION 31

REFERENCES 32

ANNEXE A - Analyse statistique 33

ANNEXE B - Logiciel d'étude des déformations et contraintes pour différentes conditions de poutres encastrées 35

ANNEXE C - Résultats des tests concernant l'influence de la déformation sur les modules dynamiques et l'amortissement 40

ANNEXE D - Analyse des fluctuations des signaux de l'amortissement 47

LISTE DES TABLEAUX

Page

1 - Caractéristiques de l'appareil DMTA 3

2 - Conditions expérimentales 5

3 - Etude statistique; trois tests sur un même échantillon 10

4 - Etude statistique; trois tests sur trois échantillons 12

5 - Liste des composantes du système de serrage modifié 15

6 - Etude statistique; quatre tests sur quatre échantillons différents avec le système de serrage modifié 18

7 - Etude statistique; les deuxième et troisième tests de la série de trois tests sur un même échantillon sans démontage avec le système de serrage modifié 21

8 - Description des variables utilisées lors des calculs des contraintes et déformations maximales 26

9 - Conditions expérimentales - étude de l'influence de la déformation 27

10 - Essais réalisés - étude de l'influence de la déformation 29

LISTE DES FIGURES

Page

1 - Le montage en flexion 2

2 - Courbes comparées des modules dynamiques des tests sur les échantillons simplement et doublement encastrés 7

3 - Courbes comparées des modules dynamiques des trois tests sur un même échantillon simplement encastré 9

4 - Courbes comparées des modules dynamiques des trois tests sur trois échantillons simplement encastrés 12

5 - Système de serrage modifié 14

6 - Courbes comparées des modules dynamiques de quatre tests sur quatre échantillons réalisés avec système de serrage modifié 17

7 - Courbes comparées des modules dynamiques de trois tests sur un même échantillon sans démontage avec le système de serrage modifié 20

8 - Conditions d'encastrement étudiées

a) Poutre encastrées - libre (sans force horizontale) 23

b) Poutre encastrée - encastrée (sans force horizontale) 24

c) Poutre encastrée - encastrée (avec forces horizontales) 25

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

a ..... Position de la force "W" (mm)

A ..... Section de l'échantillon (mm^2)

c ..... Demi-épaisseur de l'échantillon (mm)

δ ..... Angle de phase entre E' et E''

%dif ..... Différence entre la deuxième et la troisième mesure lors de la série de trois tests sur un même échantillon sans démontage

e ..... Epaisseur de l'échantillon (mm)

ϵ ..... Déformation maximale (μ m/m)

E ..... Module d'élasticité (MPa)

E' ..... Module dynamqiue en phase (MPa)

E'' ..... Module dynamique déphasé (MPa)

E.T. ..... Ecart-type

f ..... Fréquence d'excitation (Hz)

I ..... Moment d'inertie d'aire (mm^4)

int(95) .. Intervale de confiance à 95%

%(int) ... int (95) / moy

k ..... Constante

l ..... Distance libre de l'échantillon (mm)

M ..... Moment résultant de la force W et du bras levier L (N-m)

moy ..... Moyenne

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS (suite)

P ..... Force horizontale due au deplacement imposé à l'échantillon (N)

σ ..... Contrainte (Mpa)

t ..... Temps (s)

T° ..... Température (°C)

tan δ .... Tangente de l'angle δ

W ..... Force résultante opposée à y (N)

y ..... Déplacement imposé à l'extrémité de l'échantillon reliée au pot vibrant (μm)

INTRODUCTION

Ce travail fut réalisé dans le but d'étudier le fonctionnement de l'appareil de mesure des propriétés dynamiques DMTA fabriqué par la compagnie "Polymer Laboratories" [1].

Cet appareil est apparu sur le marché assez récemment de sorte que peu d'information est disponible, autrement que par le manufacturier, pour juger de la fiabilité et de l'exactitude des résultats qu'il nous donne.

Dans un premier temps, une étude fut entreprise sur la qualité des résultats obtenus de l'appareil sous diverses conditions expérimentales rencontrées couramment. Ensuite, une seconde étude fut conduite, montrant l'influence de la déformation de l'échantillon sur les modules dynamiques et sur l'amortissement, en parallèle avec une analyse théorique de cette déformation.

Enfin, l'ouvrage conclut sur une série de recommandations relatives à la zone opérationelle optimale de l'appareil.

1 - LE DMTA - PRESENTATION

Le DMTA est un appareil de mesure des propriétés dynamiques des matériaux. Il permet la mesure en flexion des modules dynamiques E' et E'' (ou de G' et G'' en cisaillement) et de l'amortissement "tan δ".

Au cours de ce travail, l'arrangement en flexion fut étudié (voir la figure 1).

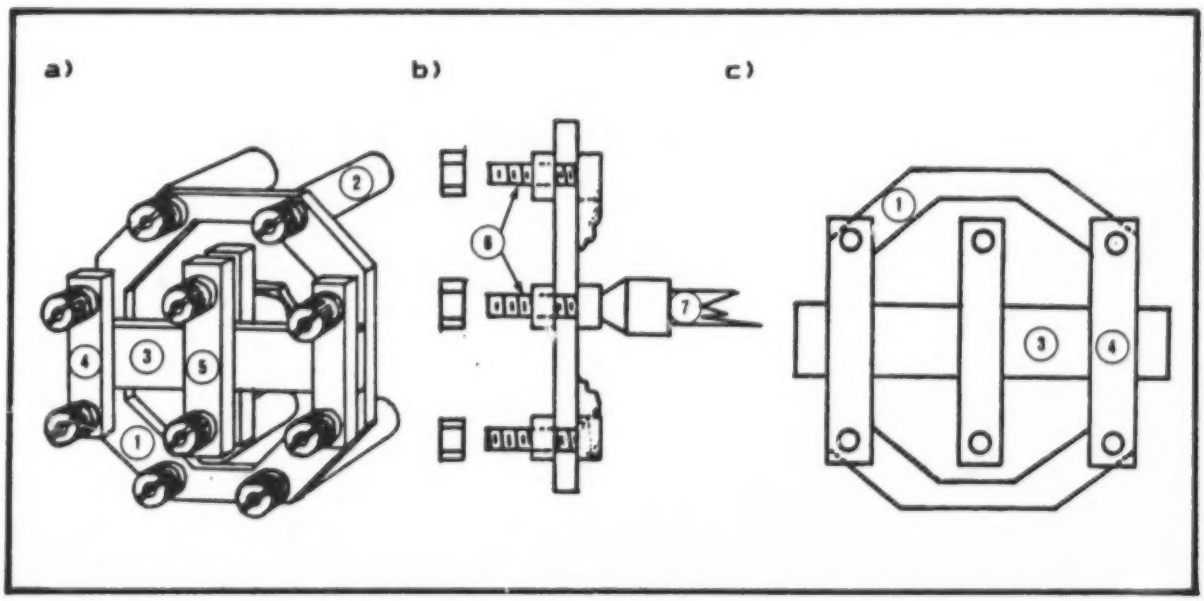


FIGURE 1: Le montage en flexion.*

a) Vue d'ensemble.

b) Vue du dessus de l'encastrement central.

c) Vue d'élévation du montage.

* Tiré de la référence [1]

Le cadre -1- est fixé sur les quatre tiges de support -2-. L'échantillon -3- est maintenu entre les plaques d'encastrement latérales -4- et centrales -5- par les vis de serrage -6- pour un double encastrement. La tige centrale -7- est reliée au pot vibrant.

Un échantillon de dimensions réduites peut aussi être sollicité en flexion simple en fixant l'une de ses extrémités à l'encastrement central et l'autre, à un des encastrements latéraux.

L'appareil offre la possibilité de réaliser des tests en combinant fréquence, déplacement et température. Ses caractéristiques sont regroupées au tableau 1.

T°	.....	-150 à +300 (°C)
f	.....	0.33 à 90 (Hz)
d(T°)/dt	.....	(chauffe) .1 à 20 (°C/min)
		(refr.) .1 à 15 (°C/min)
y	.....	16 à 256 (µm)

TABLEAU 1: Caractéristiques de l'appareil DMTA.

T° - Température de la chambre

f - Fréquence des vibrations au pot vibrant

t - Temps

d(T°)/dt - Taux de variation de la température à la chambre

y - Amplitude des vibrations à la tige centrale

Il est à noter que l'appareil DMTA comporte deux particularités (non mentionnées par le fabricant) pouvant influencer les résultats.

- La tige centrale peut, dans une certaine mesure, se déplacer latéralement.

- En périodes d'ajustement, l'appareil peut parfois surestimer la force à appliquer à l'échantillon pour atteindre le déplacement désiré, imposant par le fait même une grande déformation à l'échantillon; ceci peut possiblement entraîner un dépassement de la limite de déformation élastique du matériau.

2 - ETUDE DES PERFORMANCES ACTUELLES

2.1 Choix du matériau et des conditions expérimentales

Le matériau choisi fut le polypropylène car c'est un matériau semi-cristallin présentant une température de transition vitreuse près de la température de la pièce et pour lequel nous avons accumulés de nombreuses informations. Les échantillons sont fabriqués par moulage compression.

Au cours de cette première série de vérification, il fut convenu d'opérer aux conditions usuelles d'essais (voir le tableau 2).

Matériau :	polypropylène (Hercules, Profax 6701)	
Géométrie:		
	épaisseur: 1 (mm)	* géométrie
	largeur: 12.75 (mm)	usuelle
Zone de T°:		
	-100 à +100 (°C)	* T° de transition
Fréquence:		vitreuse = 10°C
	1 (Hz)	
Taux de		
chauffe:	2 (°C/min)	
Déformation:		
	64 (µm)	

TABLEAU 2: Conditions expérimentales

2.2 Tests réalisés

2.2.1 Echantillons doublement vs. simplement encastrés

L'influence du type d'encastrement utilisé (double ou simple) sur les modules dynamiques (E' et E'') a été étudié aux conditions expérimentales décrites précédemment.

Deux échantillons furent soumis à l'essai. Les courbes résultantes des modules dynamiques sont reproduites en figure 2.

Une forte différence fut observée sur ces modules pour l'ensemble de la gamme de température. Notons que le test auquel a été soumis l'échantillon doublement encastré a dû être arrêté à 50 °C pour cause de sa trop grande déformation. Cette forte déformation de l'échantillon doublement encastré pourrait être imputable à la cause suivante:

- l'échantillon a d'abord été encastré aux conditions de température ambiante en induisant peu d'efforts longitudinaux. Cependant, toute variation de la température induira des déformations thermiques d'importance. Au passage vers les températures élevées, les encastrements ne permettent pas que l'échantillon se dilate ce qui peut provoquer un flambage de la poutre et une perturbation du signal. Aux basses températures l'effet est plus difficile à détecter, car il tend plutôt à rigidifier la poutre (courbe "d" au-dessus de "s" aux basses températures). Cet inconvénient est moins prononcé et

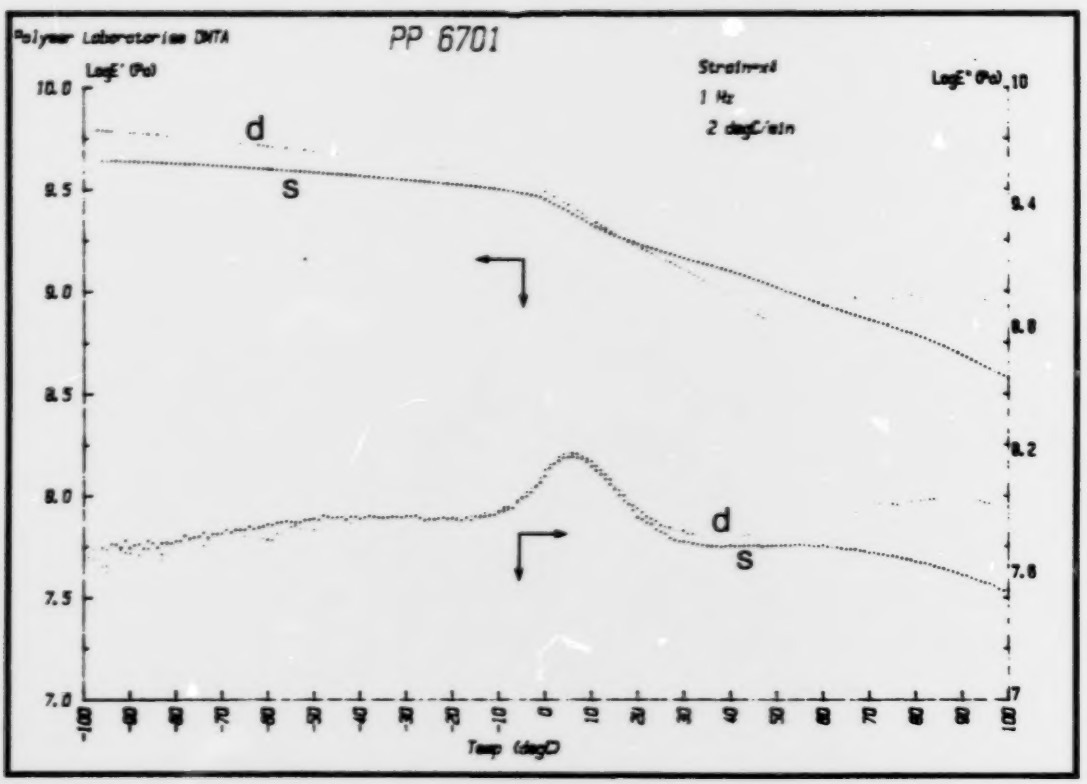


FIGURE 2: Courbes comparées des modules dynamiques des tests sur les échantillons simplement (S) et doublement (D) encastrés .

peut même être absent dans le cas simplement encastré, car la tige centrale peut supporter un certain déplacement latéral par flexion.

2.2.2 Trois tests sur le même échantillon

Cette série de tests fut entreprise sur un échantillon simplement encastré pour vérifier la reproductibilité des résultats aux conditions expérimentales décrites précédemment. L'échantillon fut démonté des tiges d'encastrement et ses caractéristiques géométriques furent mesurées entre chaque essai.

Les températures de transition vitreuse pour ces trois tests furent de 8.5, 7 et 8.5 °C.

Comme l'appareillage permet un relevé numérique pour chaque valeur mesurée, une analyse statistique (voir l'Annexe A) fut réalisée et il en résulte que la présente méthode permet d'espérer en moyenne une précision de 16% pour le module E', de 15% pour tan (δ) et de 21% pour le module E'' avec un intervalle de confiance de 95%. Il est à noter que l'erreur entre les différentes courbes est plus faible près de la température de transition.

Les courbes comparées des modules dynamiques obtenus lors de ces tests sur un même échantillon sont reproduites en figure 3 et les résultats de l'analyse statistique sont rassemblés au tableau 3.

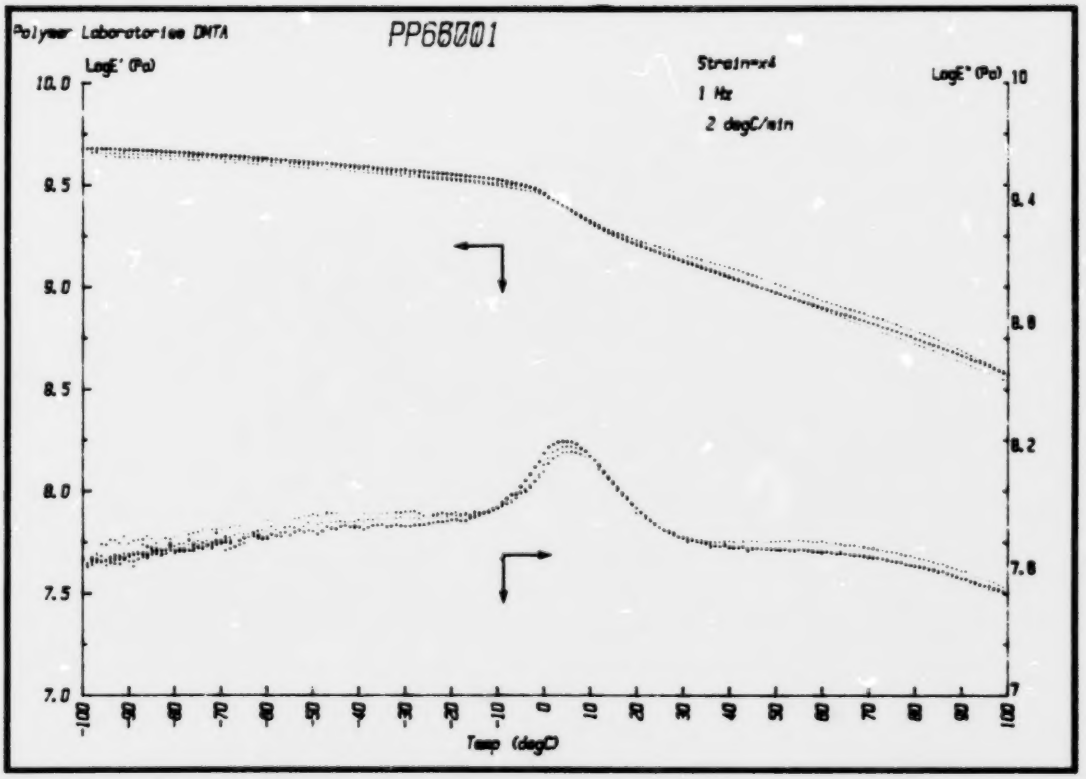


FIGURE 3: Courbes comparées des modules dynamiques des trois tests sur un même échantillon simplement encastré .

TABLEAU 3: Etude statistique ; trois tests sur un même échantillon .

	T= -90 °C			T= -50 °C		
	tan δ	E'	E''	tan δ	E'	E''
#1	.011	4.48E9	4.92E7	.020	3.83E9	7.73E7
#2	.013	3.89E9	5.16E7	.018	3.48E9	6.18E7
#3	.013	3.94E9	5.07E7	.020	3.53E9	6.87E7
moy.	.012	4.10E9	5.05E7	.019	3.61E9	6.93E7
E.T.	.0012	.326E9	.123E7	.0012	.190E9	.775E7
int(95)	.0029	.810E9	.306E7	.0029	.492E9	1.93E7
% int.	23	19.8	6.05	15	13.1	27.8
	T= 0 °C			T= +50 °C		
	tan δ	E'	E''	tan δ	E'	E''
#1	.045	2.82E9	1.25E8	.055	10.4E8	5.69E7
#2	.039	2.59E9	1.00E8	.054	9.04E8	4.90E7
#3	.041	2.61E9	1.07E8	.054	9.59E8	5.16E7
moy.	.042	2.67E9	1.11E8	.054	9.67E8	5.25E7
E.T.	.0031	.127E9	.130E8	.0006	.673E8	.402E7
int(95)	.0076	.316E9	.323E8	.0014	1.67E8	.999E7
% int.	18	12.1	29.4	2.64	17.3	19.0

2.2.3 Trois tests sur des échantillons différents

Cette série de tests fut entreprise dans le but de déterminer l'erreur expérimentale des modules dynamiques et de l'amortissement lorsque différents échantillons sont soumis à la même procédure.

Les courbes comparées des modules dynamiques pour ces tests sur trois échantillons sont reproduites à la figure 4 et les résultats de l'analyse statistique sont au tableau 4.

Les températures de transition vitreuse pour ces trois tests furent de 8.5, 10 et 10°C.

Une analyse statistique (voir l'Annexe A) fut réalisée et il en résulte que la présente méthode permet d'espérer en moyenne une précision de 9% pour le module E', de 22% pour tan (δ) et de 22% pour le module E'' avec un intervalle de confiance de 95%. Il fut aussi observé que l'erreur est plus faible près de la température de transition.

Il est à noter que l'erreur sur les modules dynamiques et sur tan δ est du même ordre lorsque le test est fait sur trois échantillons différents ou sur un seul.

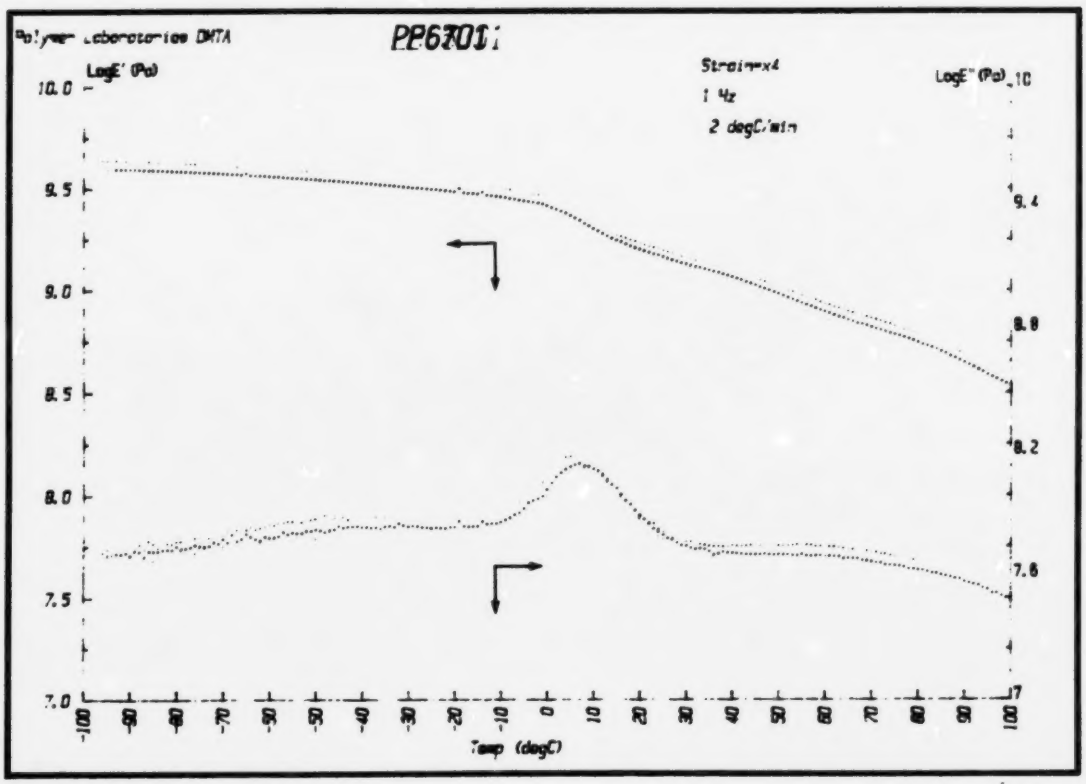


FIGURE 4: Courbes comparées des modules dynamiques des trois tests sur trois échantillons simplement encastrés .

TABLEAU 4: Etude statistique ; trois tests sur trois échantillons .

	T= +90 °C			T= −50 °C		
	tan δ	E'	E''	tan δ	E'	E''
#1	.013	3.34E9	5.53E7	.020	3.83E9	7.73E7
#2	.010	4.70E9	4.51E7	.016	4.08E9	6.35E7
#3	.011	4.48E9	4.92E7	.017	3.95E9	6.87E7
moy.	.0113	4.50E9	4.99E7	.0177	3.96E9	6.98E7
E.T.	.0015	.183E9	.516E7	.0021	.127E9	.694E7
int(95)+ −	.0037	.455E9	1.28E7	.0052	.316E9	1.72E7
%int/moy	33	10.1	25.6	29.5	7.97	24.7
	T= 0 °C			T= +50 °C		
	tan δ	E'	E''	tan δ	E'	E''
#1	.045	2.82E9	1.25E8	.055	1.04E9	5.69E7
#2	.053	2.88E9	1.53E8	.056	9.33E8	5.18E7
#3	.047	2.86E9	1.35E8	.056	9.35E9	5.19E7
moy.	.0483	2.85E9	1.38E8	.0557	9.69E8	5.35E7
E.T.	.0042	3.00E7	.143E8	.0006	.596E8	.292E7
int(95)+ −	.0103	7.45E7	.355E8	.0014	1.48E8	.725E7
%int/moy	21.4	2.62	25.7	2.58	15.3	13.6

3 - ETUDE SUR LE MODE DE SERRAGE

Cette étude fut entreprise suite à une série d'observations montrant que la force de serrage entre l'échantillon et l'encastrement se retrouvait beaucoup plus faible à la fin de chacun des tests. Le comportement viscoélastique des matériaux à tester apparaît être à l'origine de cette défaillance mécanique.

3.1 Modifications apportées au montage

Le présent système de fixation des échantillons utilise des contre-écrous. Il fut modifié de façon à permettre à la force de serrage de rester constante et uniformément distribuée aux encastrements pendant toute la durée d'un test.

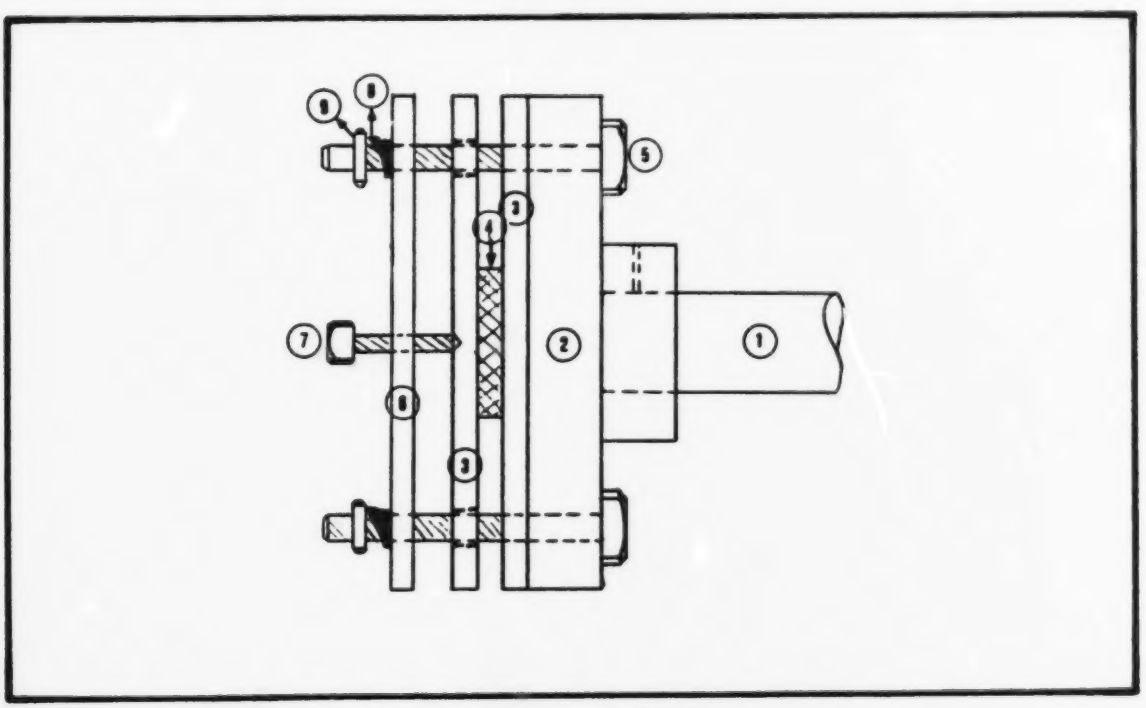


FIGURE 5: Système de serrage modifié.

L'échantillon est maintenu en place à chaque encastrement grâce à une seule vis de serrage -7- centrale (voir la figure 5), permettant une distribution uniforme de la charge. La force est assumée constante pendant toute la durée du test grâce à deux rondelles fendues -8- situées sous les écrous de soutien -9- et agissant comme ressort. La liste des composantes du système modifié est produite au tableau 5.

TABLEAU 5: Liste des composantes du système de serrage modifié

1) Tige de support
2) Cadre
3) a, b Plaques d'encastrement
4) Echantillon
5) Vis
6) Tige d'appui
7) Vis de serrage
8) Rondelle de bloquage
9) Ecrous de soutien

3.2 Tests réalisés avec le système de serrage modifié

3.2.1 Quatre tests sur des échantillons différents

Une série de quatre tests fut entreprise sur quatre échantillons simplement encastrés de façon à évaluer l'efficacité du système de serrage modifié en regard des mesures sur les modules dynamiques et l'amortissement. La procédure expérimentale décrite au chapitre 1 fut respectée. Un couple de .75 N-m fut appliqué aux vis de serrage au début de chaque test.

Les courbes comparées des modules dynamiques sont reproduites à la figure 6 et les résultats de l'analyse statistique, au tableau 6.

Les températures de transition vitreuse pour ces quatre tests furent de 10.5, 9.5, 10 et 10°C.

Une analyse statistique (voir l'Annexe A) fut réalisée et il en résulte que la présente méthode permet d'espérer en moyenne une précision de 13% pour le module E', de 22% pour tan (δ) et de 21% pour le module E'' avec un intervalle de confiance de 95%.

Outre l'interprétation des statistiques, l'amélioration apportée à la procédure de serrage apparaît très satisfaisante. L'échantillon est mieux assujetti du début à la

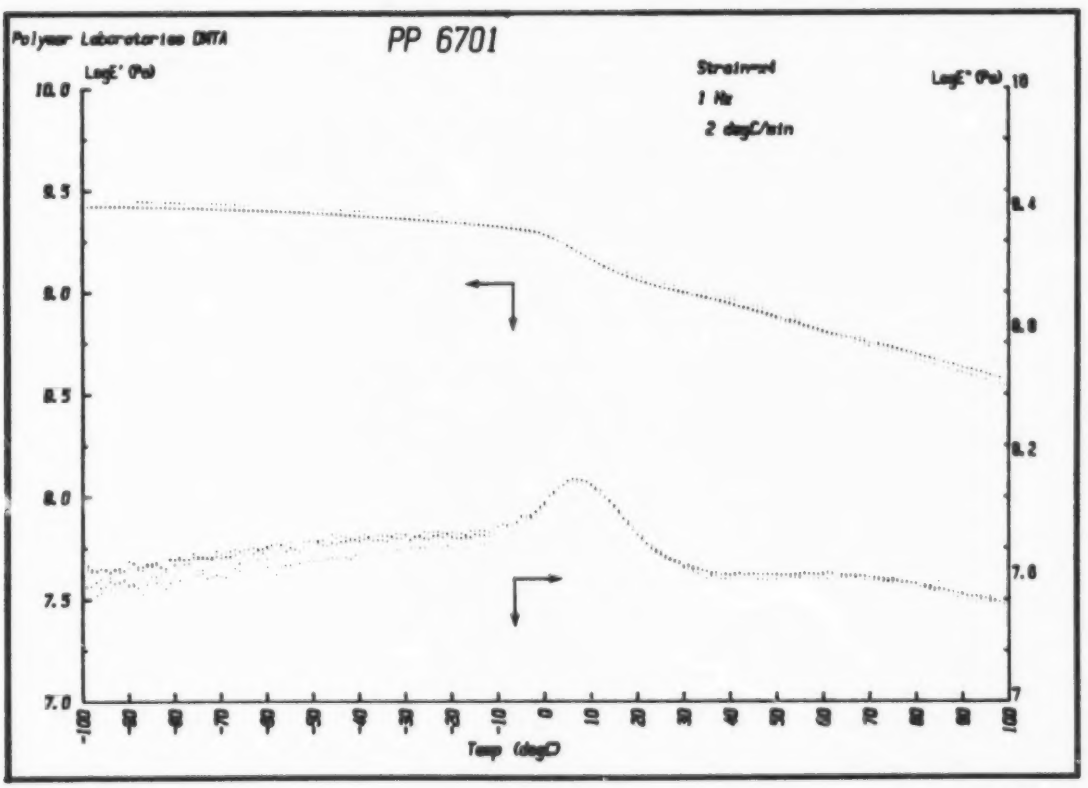


FIGURE 6: Courbes comparées des modules dynamiques de quatre tests sur quatre échantillons réalisés avec le système de serrage modifié .

TABLEAU 6: Etude statistique ; quatre tests sur quatre échantillons différents - système de serrage modifié .

	T= -90 °C			T= -50 °C		
	tan δ	Log E'	Log E''	tan δ	Log E'	Log E''
#1	.019	2.63E9	4.86E7	.024	2.45E9	5.79E7
#2	.017	2.61E9	4.53E7	.025	2.44E9	6.10E7
#3	.013	2.94E9	3.77E7	.020	2.73E9	5.42E7
#4	.013	2.79E9	3.68E7	.019	2.58E9	4.90E7
moy.	.0155	2.74E9	4.21E7	.022	2.55E9	5.55E7
E.T.	.003	.158E9	.579E7	.0029	.135E9	.516E7
int(95)	.0075	.393E9	1.44E7	.0073	.335E9	1.28E7
%int.	48	14.3	34.2	33	13.2	23.7
	T= 0 °C			T= +50 °C		
	tan δ	Log E'	Log E''	tan δ	Log E'	Log E''
#1	.048	1.92E9	9.20E7	.056	7.62E8	4.22E7
#2	.049	1.92E9	9.44E7	.053	7.38E8	3.94E7
#3	.049	2.13E9	10.4E7	.053	8.30E8	4.36E7
#4	.046	2.01E9	9.25E7	.052	7.91E8	4.10E7
moy.	.048	1.99E9	9.56E7	.0535	7.80E8	4.15E7
E.T.	.0014	9.95E7	.537E7	.0017	.395E8	.178E7
int(95)	.0035	.247E9	1.33E7	.0043	.981E8	.442E7
%int.	.73	12.4	14.0	8.04	12.6	10.7

fin de l'essai, car les nouveaux éléments du système permettent de compenser adéquatement le fluage présent dans les zones d'encastrement.

3.2.2 Trois tests sur un même échantillon sans démontage

Cette série de tests fut entreprise dans le but de cerner la cause des fluctuations des modules dynamiques et de l'amortissement observées à la section précédente.

L'échantillon fut monté aux encastrements et un couple de .75 N-m fut appliqué aux vis de serrage au début du premier test. Les deux tests subséquents furent réalisés à la suite de celui-ci, sans démontage de l'échantillon et sans réajustement du couple.

Il est intéressant de noter que les résultats aux deuxième et troisième essais de cette série sont presque identiques (voir la figure 7 et le tableau 7). Ce fait semble indiquer que la prise des mesures de l'appareil DMTA est juste et que les erreurs observées auparavant sont imputables à la procédure expérimentale (serrage, géométrie non uniforme, histoire de l'échantillon, etc.) plutôt qu'à l'appareil lui-même qui arrive à reproduire deux fois la même courbe quand les conditions sont identiques. Il apparaît clair que le premier essai a permis de "faire perdre la mémoire" en regard de l'histoire passée du matériau. Une forme de rodage semblerait donc nécessaire.

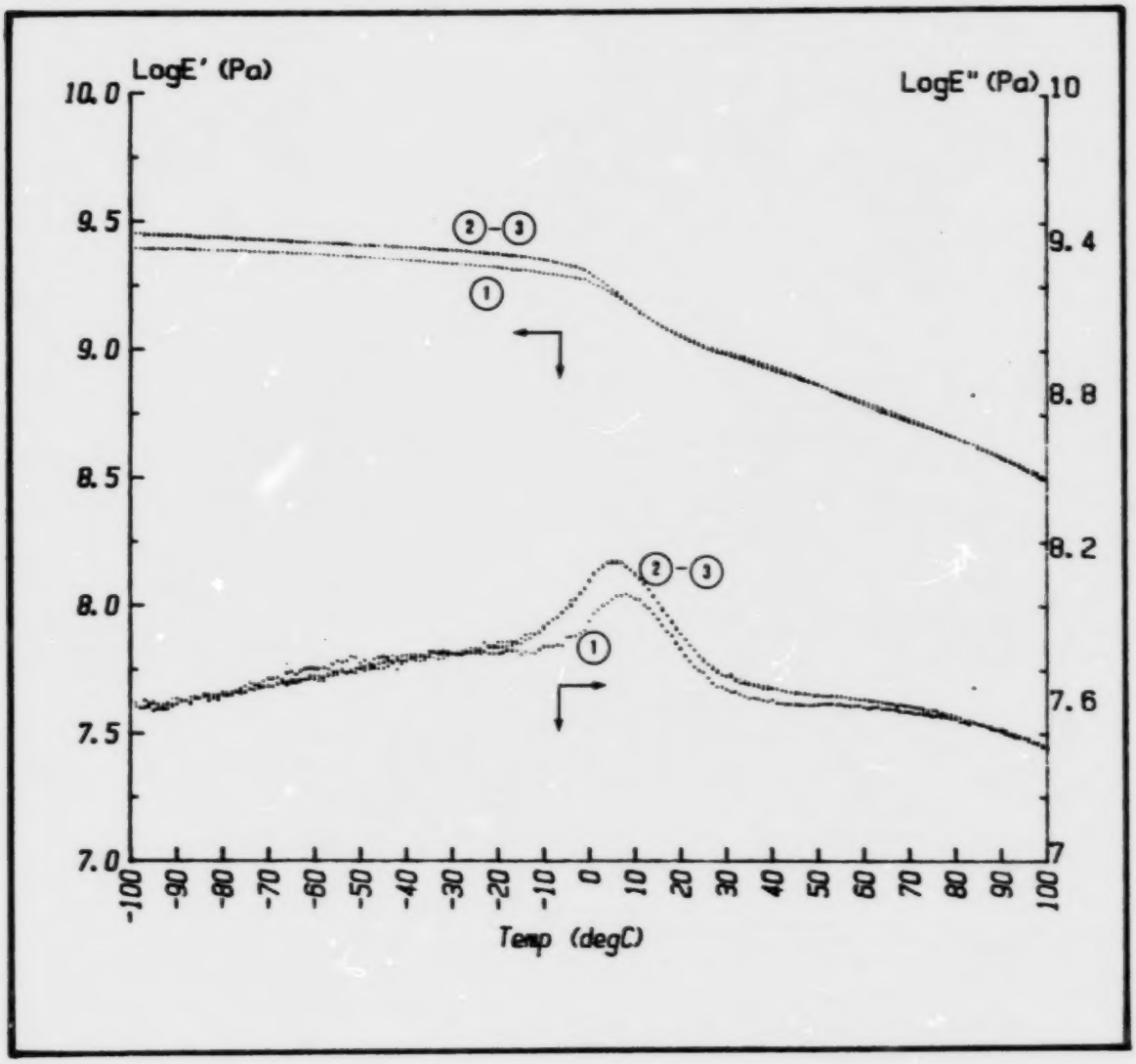


FIGURE 7: Courbes comparées des modules dynamiques des trois tests sur un même échantillon sans démontage avec le système de serrage modifié .

TABLEAU 7: Etude statistique ; les deuxième et troisième tests de la série de trois tests sur un même échantillon sans démontage avec le système de serrage modifié .

	T= -90 °C			T= -50 °C		
	tan δ	E'	E''	tan δ	E'	E''
#2	.016	2.75E9	4.37E7	.022	2.58E9	5.71E7
#3	.016	2.81E9	4.34E7	.022	2.58E9	5.66E7
%dif.	0	1.84	0.69	0	0	0.92
	T= 0 °C			T= 50 °C		
	tan δ	E'	E''	tan δ	E'	E''
#2	.062	2.02E9	1.25E8	.062	7.29E8	4.51E7
#3	.063	2.01E9	1.27E8	.061	7.29E8	4.47E7
%dif.	1.60	0.46	1.80	1.63	0	0.92

4 - INFLUENCE DE LA DEFORMATION

Cette étude fut entreprise dans le but de mieux comprendre et de cerner les conditions optimales de fonctionnement de l'appareil DMTA.

L'influence de trois des paramètres pouvant avoir un impact sur la déformation au sein de l'échantillon fut étudiée, soient l'épaisseur, la longueur et le déplacement latéral.

4.1 Etude théorique

L'échantillon fut étudié suivant le modèle élastique développé à la référence [2]. Etant donné la géométrie du cadre et des échantillons, l'approximation de poutre fut faite et cela n'entraîne pas d'erreurs importantes.

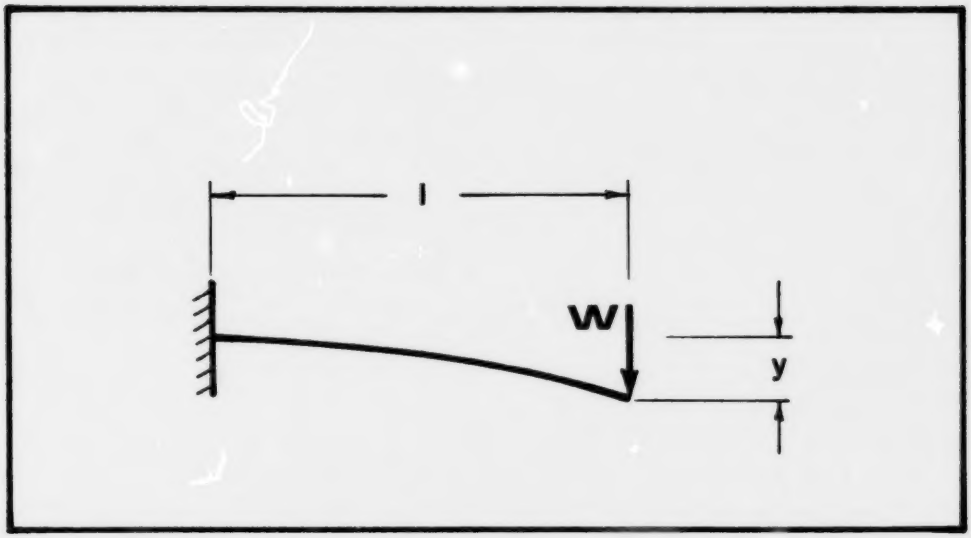
Trois cas de conditions d'encastrement furent étudiées. Un logiciel fut développé afin de traiter ce type de problème (voir l'Annexe B).

Les contraintes et déformations maximales furent calculées et la procédure est détaillée aux pages suivantes.

FIGURE 8: Conditions d'encastrement étudiées.

a) poutre encastrée - libre

(sans force horizontale)



Paramètre connus: y, E, I, l, c.

.....

$W = (6*y*EI) / (2*l^3)$

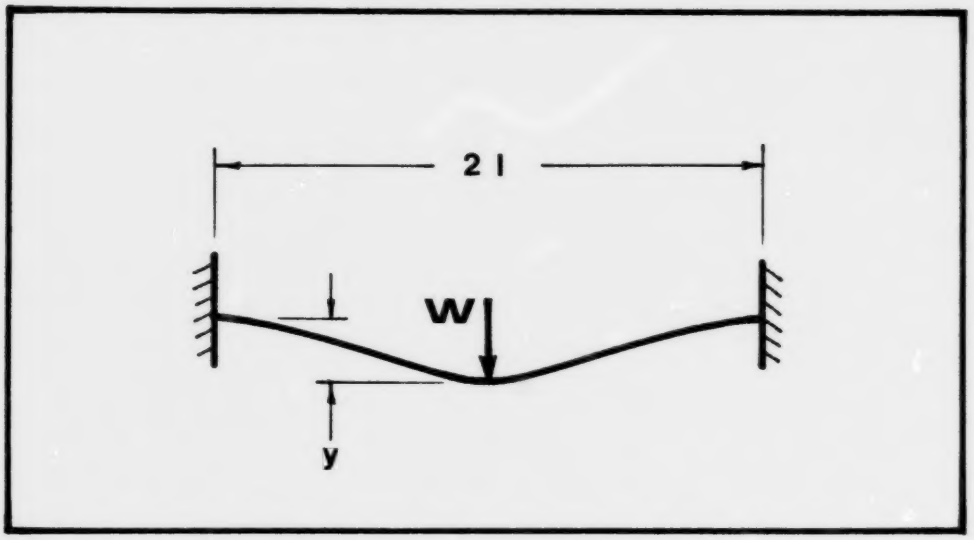
$M = W*l$

$\sigma = M*c/I$

$\epsilon = \sigma/E$

b) poutre encastrée - encastrée

(sans force horizontale)



Paramètre connus: y, E, I, l, c.

.....

$W = (192 * y * EI) / (8 * l^3)$

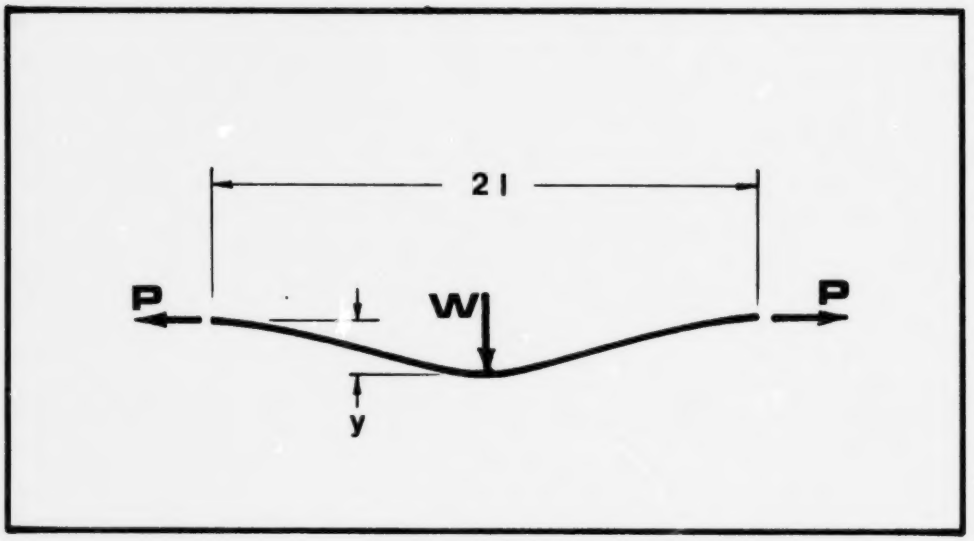
$M = W * l / 4$

$\sigma = M * c / I$

$\epsilon = \sigma / E$

c) poutre encastrée - encastrée

(avec forces horizontales) .



Paramètres connus : y , E , I , l , c , A .

.....

$W = (y + A*y^3/16*I)*(2*\pi^4*EI)/l^3$

$P = (\pi^2*E*A*y^2)/(4*l^2)$

$k = \sqrt{(P/EI)}$

$M = f(W,k)$

$\sigma = P/A + M*c/I$

$\epsilon = \sigma/E$

y ... déplacement imposé à l'extrémité de l'échantillon reliée au pot vibrant (µm)

E ... module élastique du matériau (MPa)

I ... moment d'inertie d'aire (mm^4)

l ... distance de l'encastrement au point d'application de la force (mm)

ϵ ... déformation maximale (µ m/m)

σ ... contrainte maximale (Pa)

W ... force résultante (N)

M ... moment résultant de la force W et au bras de levier l (N-m)

c ... demie-épaisseur de l'échantillon(mm)

A ... aire de l'échantillon (mm^2)

k ... constante

P ... force horizontale due au déplacement imposé au matériau (N)

TABLEAU 8: Description des variables utilisées lors des calculs des contraintes et déformations maximales .

4.2 Procédure d'essais

Une série de 27 essais fut entreprise sur le polypropylène afin de déterminer l'influence de la déformation sur la performance aux tests de flexion dynamique. Pour ce faire, l'épaisseur de l'échantillon, la déflexion et la portée furent les paramètres variés pour un arrangement simplement encastré.

Les conditions expérimentales sont spécifiées au tableau 9 et le tableau 10 résume la série d'essais réalisée.

Matériau:	
	Polypropylène
Dimensions:	
	largeur : 12.75 mm
	épaisseur: 0.5, 0.75, 1 mm
	portée : 4, 10, 16 mm
Zone de T°:	
	-20 à +40°C
Taux de chauffe:	
	2°C/min
Fréquence:	
	1 Hz
Déflexion:	
	64,128,256 µm

TABLEAU 9: Conditions expérimentales - étude de l'influence de la déformation

Les nombres inscrits dans le tableau 10 correspondent aux déformations calculées à partir du cas b décrit à la figure 8.

Les déformations (en µm/m) sont maximales à la fibre extérieure, tout près de l'encastrement et s'expriment par:

$$\epsilon = \frac{Mc}{EI}$$

$$\epsilon = \frac{6yc}{l^2} * 10^3 = \frac{3ye}{l^2} * 10^3$$

ou encore, en utilisant le terme "strain" proposé par le manufacturier:

$$\epsilon = \frac{48e}{l^2} * 10^3 * \text{strain}$$

(avec y = 16 * strain)

TABLEAU 10: Essais réalisés - étude de l'influence de la déformation

DEPLACEMENT (µm)

(e = 1 mm)

Portée (mm)	16	64	256
4.	3000	12000	48000
10.	480	1920	7680
16.	190	750	3000

(e = 0.5 mm)

	16	64	256
4.	1500	6000	24000
10.	240	960	3840
16.	95	375	1500

(e = 0.75 mm)

	16	64	256
	2250	9000	36000
	360	1440	5760
	140	560	2250

4.3 Résultats et analyse

Les courbes résultantes de la série d'essais ont été reproduites à l'Annexe C. Les quatre observations suivantes ont été formulées à partir de ces résultats.

- L'amortissement (tan δ) tend à augmenter avec un accroissement de la déformation maximale (ϵ) atteinte à l'essai. Par conséquent, une augmentation de l'épaisseur et de la déflexion ou une diminution de la portée de l'échantillon contribuent à une augmentation de l'amortissement mesuré.

- Les modules dynamiques E' et E'' mesurés aux tests où la portée était de 4 mm, sont plus faibles que les autres.

- La fluctuation des signaux des modules dynamiques et de l'amortissement diminue avec une augmentation de la déformation (ϵ) atteinte à l'essai (voir l'Annexe D).

- La température de transition vitreuse diminue avec une diminution de l'épaisseur de l'échantillon (9.7°C pour e=1 mm, 8.5°C pour e=0.75 mm, 7.5°C pour e=0.5 mm), le transfert de chaleur pouvant jouer un rôle significatif lors des essais.

CONCLUSION

Au cours de ce travail, il a été possible d'évaluer les performances de l'appareil de mesure des propriétés dynamiques "DMTA".

Dans un premier temps, les performances de l'appareil ont été étudiées pour des conditions expérimentales usuelles et la marge d'erreur imputable à la procédure a été déterminée. Ensuite, le mode de serrage de l'échantillon a été analysé et certaines modifications ont été apportées au système.

Un examen systématique des paramètres géométriques liés à cette technique a permis de formuler des tendances certaines. Il a été démontré, en particulier, que le niveau de déformation imposé avait une grande influence sur la fluctuation des signaux destinés au calcul des propriétés dynamiques.

Cette analyse pratique de l'appareil permettra, nous le croyons, de mieux contrôler les procédures d'essai et d'avoir une idée plus juste de l'ordre de grandeur des erreurs associées à ces mesures.

REFERENCES

[1] Guide de l'usager de l'appareil "DMTA", Polymer Laboratories.

[2] ROARK, R.J., YOUNG, W.C., Formulas for Stress and Strain, Fifth ed., McGraw-Hill ed., 1982.

[3] HINES, W.W., MONTGOMERY, D.C., Probability and Statistics in Engineering and Management Sciences, Wiley, 2e ed., 1980.

ANNEXE A

ANALYSE STATISTIQUE

Les présentes formules sont tirées de la référence [3] et s'appliquent aux tableaux 3, 4 et 6.

1 - Moyenne

$$\mu = \Sigma (x_i) / n$$

μ ..... moyenne

x_i ..... variable étudiée

n ..... population de x_i

2 - Ecart-type

$$s = \sqrt{ [\Sigma (x_i - x)^2] / (n-1) }$$

s ..... écart-type estimé

3 - Intervalle de confiance à $(1-\alpha)\%$

$$P [x - (t_{n-1,\alpha/2}) * s/\sqrt{n} < \mu < x + (t_{n-1,\alpha/2}) * s/\sqrt{n}] = (1-\alpha)$$

P ..... probabilité de l'événement

$t_{n-1,\alpha/2}$ .... distribution de Poisson pour une population de $(n-1)$ et une porbabilité de $(1-\alpha)$

ANNEXE B

LOGICIEL D'ETUDE DES DEFORMATIONS ET CONTRAINTES

POUR DIFFERENTES CONDITIONS DE POUTRES ENCASTREES

```
1 EE = 2.71828183:PI = 3.14159
6  HOME : VTAB 5: PRINT "     QUEL TYPE DE PROBLEME"
7  PRINT : PRINT "     DESIREZ-VOUS TRAITER ? ": PRINT : PRINT
8  PRINT : PRINT : PRINT "     1) DEMI POUTRE (SCANT)
9  PRINT : PRINT : PRINT "     2) POUTRE ENTIERE (DCANT)"
13  PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "              ": GET E$
17  IF  NOT (E$ = "1" OR E$ = "2") THEN 6
19  HOME : VTAB 6
20  PRINT "  QUEL EST LA LARGEUR DE                  ";
22  PRINT : INPUT "  L'ECHANTILLON (MM) ";L1
30 L = L1 / 25.4
35  PRINT : PRINT : PRINT
40  PRINT "  QUEL EST L'EPAISSEUR DE"
42  PRINT : INPUT "  L'ECHANTILLON (MM) ";E1
43  PRINT : PRINT : PRINT
45  PRINT "  QUEL EST LE DEPLACEMENT IMPOSE "
46  PRINT : INPUT "  A L'ECHANTILLON (MICRON)  ";Y1
47 YN = Y1 / 25400: HOME : VTAB 6:EP = E1 / 25.4: PRINT : PRINT : PRINT
52  IF E$ = "1" THEN  PRINT "  QUEL EST LA PORTEE DE"
54  IF E$ = "1" THEN  PRINT
55  IF E$ = "1" THEN  INPUT "  LA POUTRE (MM) ";L3
56  IF E$ = "1" THEN L4 = L3 / 25.4
57  IF E$ = "2" THEN  PRINT "  QUEL EST LA LONGUEUR ENTRE "
58  IF E$ = "2" THEN  PRINT
60  IF E$ = "2" THEN  INPUT "  LES ENCASTREMENTS (MM) ";CG
61  IF E$ = "2" THEN  GOTO 6000
62  IF E$ = "2" THEN  PRINT "  QUEL EST LA LARGEUR"
63  IF E$ = "2" THEN  PRINT
64  IF E$ = "2" THEN  INPUT "  DE L'APPUIS CENTRAL (MM) ";EF
65  IF E$ = "2" THEN L4 = (CG - EF) / 25.4
70 I = L * EP ^ 3 / 12:A = L * EP:E = 55170
92  HOME
98  PRINT "  ***** SIMPLE ENCASTREMENT *****": PRINT
100  PRINT : PRINT "  1) ENC.-LIBRE ,DEPL. A L'EXT. LIBRE"
110  PRINT : PRINT "  2) ENC.-GUIDE ,DEPL.AU GUIDE,SANS F.A"
112  PRINT : PRINT "  3) ENC.-GUIDE ,DEPL.AU GUIDE,AVEC F.A"
113  PRINT
117  PRINT : PRINT "  ***** DOUBLE ENCASTREMENT *****"
119  PRINT : PRINT "  4) ENC.-ENC.,DEPL AU CENTRE,SANS F.A"
121  PRINT : PRINT "  5) ENC.-ENC.,DEPL AU CENTRE,AVEC F.A"
122  PRINT
123  PRINT : PRINT "  ****************************************"
124  PRINT : PRINT "  6) RE-INITIALISATION DES PARAMETRES"
126  PRINT : PRINT "  7) FIN DU PROGRAMME"
128  VTAB 23: PRINT : GET PO
130  IF (PO = 1 AND E$ = "1") THEN 200
140  IF (PO = 2 AND E$ = "1") THEN 400
150  IF (PO = 3 AND E$ = "1") THEN 1000
160  IF (PO = 4 AND E$ = "2") THEN 1600
161  IF (PO = 5 AND E$ = "2") THEN 1000
```

```
162  IF PO = 6 THEN 1
170  IF PO = 7 THEN 10000
180  IF  NOT ((PO = 1 AND E$ = "1") OR (PO = 2 AND E$ = "1") OR (PO = 3 AND E$ = "1") OR (PO = 4 AND E
     $ = "2") OR (PO = 5 AND E$ = "2")) THEN 92
200 M =  - (3 * E * I * YM / L4 ^ 3)
210 TA = M * L4 ^ 2 / (2 * E * I)
220 RA = 0:MA = 0:RB = M:MB =  - M * L4:TB = 0:YB = 0
225 FM = (MB * EP / (2 * I * E))
230  HOME : HGR
235  HPLOT 35,50 TO 35,125
240  FOR M = 0 TO 15
250  HPLOT 35,50 + M * 5 TO 28,50 + M * 5 - 7: NEXT
265  FOR J = 1 TO 150
268 JH =  INT ((YM + TA * J + M * J ^ 3 / 6 / E / I) /  - 10000) + 75
270  HPLOT J + 35,JH: NEXT
276  HPLOT 185,JH TO 185,JH - 20: HPLOT 185,JH TO 188,JH - 3: HPLOT 185,JH TO 182,JH - 3
277  VTAB 22
278  INPUT "    APPUYEZ SUR <RETURN> ";JG$: TEXT : HOME
280  VTAB 5: PRINT " CONTRAINTE MAX = "; ABS ( INT (100 * M * L4 * EP / 2 / I) / 100);" PSI"
290  VTAB 9: PRINT " CISAILLEMENT MAX = "; ABS ( INT (1000 * 3 / 2 * M / (EP * L)) / 1000);" PSI"
297  VTAB 13: PRINT " DEFORMATION MAX (+) = "; ABS ( INT (1000000 * FM));" MICRO M/M"
298  VTAB 15: PRINT "                    (-) = "; -  ABS ( INT (1000000 * FM));" MICRO M/M"
300  VTAB 23: INPUT "    APPUYEZ SUR <RETURN> ";JG$
350  HOME : GOTO 92
400 M =  - YM * 12 * E * I / L4 ^ 3
410 MA = M * L4 / 2:MB = MA:RB = M:TB = 0:YB = 0:RA = 0:TA = 0
415 FM = (MB * EP / (2 * I * E))
420  HOME : HGR
430  HPLOT 35,50 TO 35,125
440  FOR M = 0 TO 15
450  HPLOT 35,50 + M * 5 TO 28,50 + M * 5 - 7
460  NEXT
470  FOR J = 1 TO 150
480  HPLOT J + 35,72 -  INT ( COS (J / 48) * 10)
500  NEXT
502  HPLOT 178,93 TO 178,79 TO 192,79 TO 192,93 TO 178,93
504  HPLOT 185,77 TO 185,57: HPLOT 185,77 TO 188,74: HPLOT 185,77 TO 182,74
510  VTAB 23: INPUT "    APPUYEZ SUR <RETURN> ";JG$
520  TEXT : HOME : IF PO = 3 THEN  GOTO 1280
530  VTAB 5: PRINT " CONTRAINTE MAX = "; ABS ( INT (100 * MA * EP / 2 / I) / 100);" PSI"
540  VTAB 9: PRINT " CISAILLEMENT MAX = "; ABS ( INT (1000 * 3 / 2 * M / (EP * L)) / 1000);" PSI"
545  VTAB 13: PRINT " DEFORMATION MAX (+) = "; ABS ( INT (1000000 * FM));" MICRO M/M"
547  VTAB 15: PRINT "                    (-) = "; -  ABS ( INT (1000000 * FM));" MICRO M/M"
550  VTAB 23: INPUT "    APPUYEZ SUR <RETURN> ";JG$: HOME : GOTO 92
1000  HOME
1005  IF PO = 3 THEN L4 = L4 * 2
1010 M1 = YM + ((A) * YM ^ 3 / (16 * I))
1020 M2 = ((L4 ^ 3) / (2 * PI ^ 4 * E * I))
1030 M = (M1 / M2)
1040 P = (PI ^ 2 * E * A * YM ^ 2 / (4 * L4 ^ 2))
1080 K = (P / (E * I)) ^ 0.5
1100 U = K * L4
```

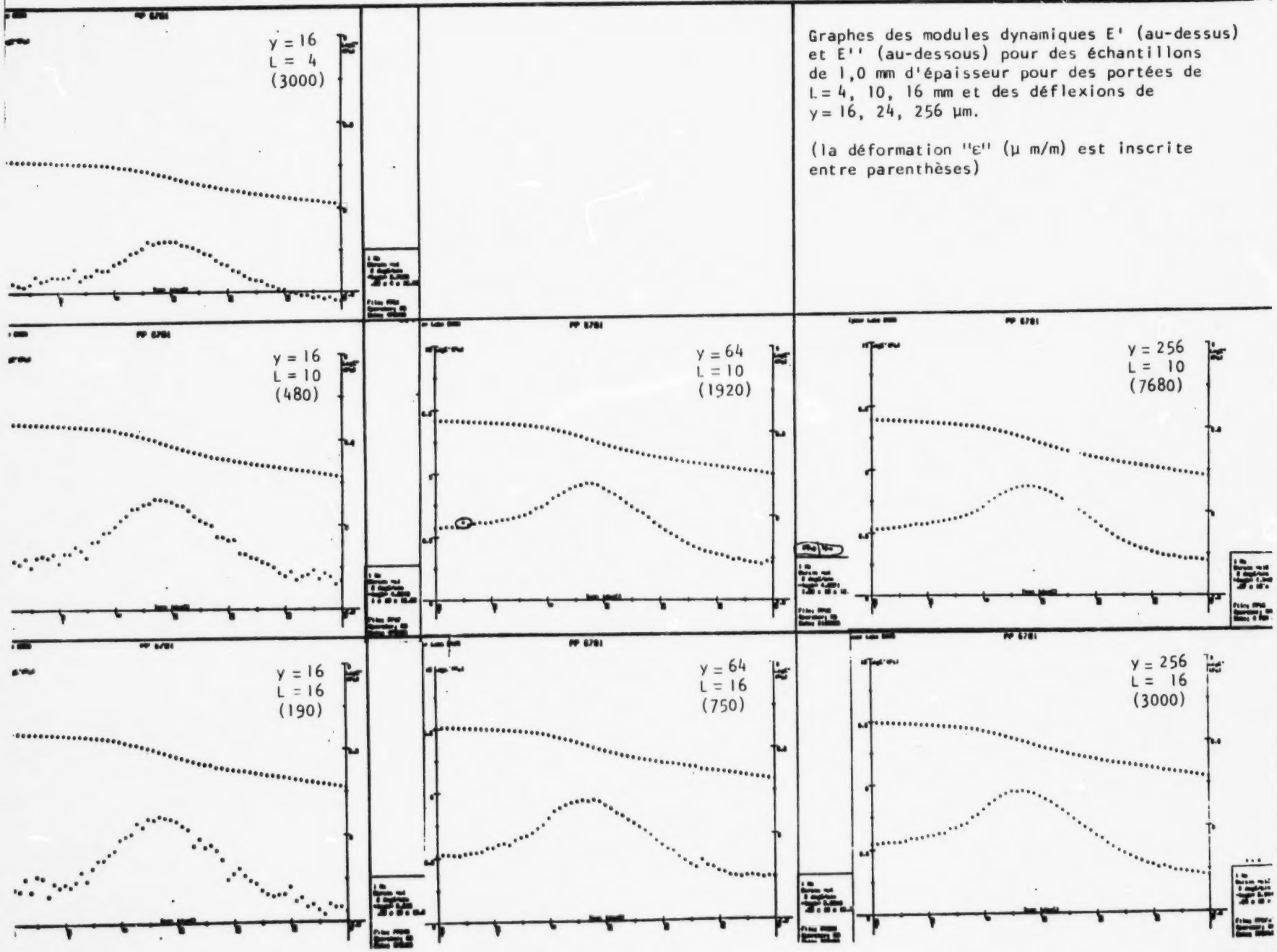
```
1105 X = (EE ^ U - EE ^ ( - U)) / 2
1110 C2 = X
1130 U = K * L4 / 2
1135 Y = (EE ^ U + EE ^ ( - U)) / 2
1140 A1 = Y
1160 U = K * L4
1165 Y = (EE ^ U + EE ^ ( - U)) / 2
1170 C3 = Y - 1:C1 = Y
1190 U = K * L4 / 2
1195 X = (EE ^ U - EE ^ ( - U)) / 2
1200 A2 = X
1220 C4 = C2 - K * L4
1230 A3 = A1 - 1
1240 A4 = A2 - K * L4 / 2
1260 RA = W * (C3 * A3 - C2 * A4) / (C3 ^ 2 - C2 * C4)
1270 MA =  - W / K * ((C4 * A3 - C3 * A4) / (C3 ^ 2 - C2 * C4))
1272  IF PO = 3 THEN  GOTO 420
1274  IF PO = 5 GOTO 1630
1280  VTAB 6
1310 SI =  ABS (P / (A)) +  ABS (MA * (EP / 2) / I)
1314 FM = ( ABS (MA * EP / 2 / I) +  ABS (P / A)) / E
1315 FP = ( -  ABS (MA * EP / 2 / I) +  ABS (P / A)) / E
1320  VTAB 5: PRINT "  CONTR.MAX.= "; ABS ( INT (100 * SI) / 100);" PSI"
1323  VTAB 8: PRINT "  CISAILLEMENT MAX = "; ABS ( INT (1000 * 3 / 2 * RA / (EP * L)) / 1000);" PSI"
1330 MD = MA / P * (A3) + RA / P / K * A4
1339 MJ = MD * 25400
1340  VTAB 11: PRINT "  DEFL.CENTR.REC.= "; ABS ( INT (100 * MJ) / 100);" MICRONS"
1360  VTAB 14: PRINT "  DEFORMATION MAX (+) = ";( INT (1000000 * FM) / 1);" MICRO M/M"
1370  VTAB 16: PRINT "                      (-) = ";( INT (1000000 * FP) / 1);" MICRO M/M"
1400  PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "                        ": GET F$
1510  HOME : GOTO 92
1600 W =  - 192 * E * I * YM / L4 ^ 3:MA = W * L4 / 8:RA = W / 2
1624 FM = ( ABS (MA * EP / 2 / I)) / E
1630  HOME : HGR
1640  HPLOT 35,50 TO 35,125
1650  FOR M = 0 TO 15
1660  HPLOT 35,50 + M * 5 TO 28,50 + M * 5 - 7: NEXT
1680  FOR J = 1 TO 180
1690  HPLOT J + 35,75 -  INT ( COS (J / 29) * 10): NEXT
1710  HPLOT 215,50 TO 215,125
1720  FOR M = 0 TO 15
1730  HPLOT 215,50 + M * 5 TO 222,50 + M * 5 - 7: NEXT
1745  HPLOT 125,65 TO 125,83: HPLOT 125,83 TO 122,80: HPLOT 125,83 TO 128,80
1750  VTAB 23: INPUT "    APPUYEZ SUR <RETURN> ";J$
1760  TEXT : HOME
1765  IF (PO = 5 OR PO = 3) THEN 1280
1770  VTAB 7: PRINT "  CONTRAINTE MAX = "; ABS ( INT (100 * MA * EP / 2 / I) / 100);" PSI"
1780  VTAB 10: PRINT "  CISAILLEMENT MAX = "; ABS ( INT (1000 * 3 / 2 * RA / (EP * L)) / 1000);" PSI"
1786  VTAB 13: PRINT " DEFORMATION MAX (+) = "; ABS ( INT (1000000 * FM));" MICRO M/M"
1787  VTAB 15: PRINT "                      (-) = ";  -  ABS ( INT (1000000 * FM));" MICRO M/M"
```

```
1790  VTAB 23: INPUT "    APPUYEZ SUR <RETURN> ";JG$
1800  HOME : GOTO 92
3000  HOME : VTAB 12: PRINT "          BYE-BYE"
5070  GOTO 1000
6000  PRINT : PRINT : PRINT : GOTO 62
10000  HOME : VTAB 12: PRINT "               BYE-BYE"

]
```

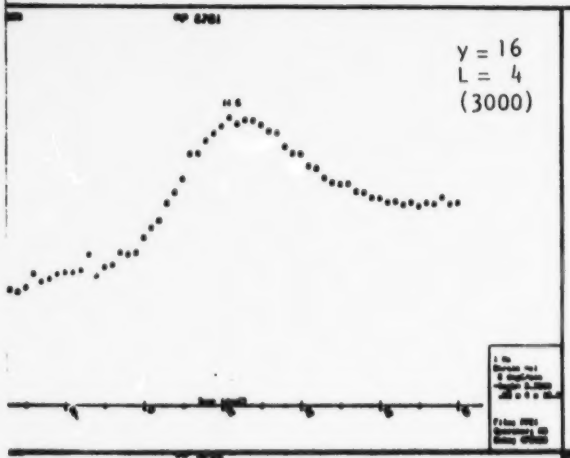
ANNEXE C

RESULTATS DES TESTS CONCERNANT L'INFLUENCE DE LA DEFORMATION SUR LES MODULES DYNAMIQUES ET L'AMORTISSEMENT



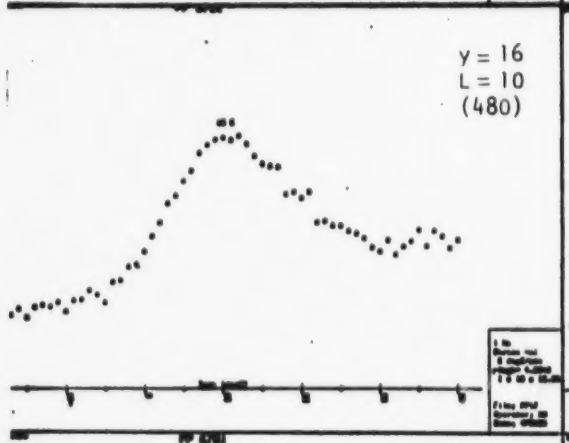
Graphes des modules dynamiques E' (au-dessus) et E'' (au-dessous) pour des échantillons de 1,0 mm d'épaisseur pour des portées de L = 4, 10, 16 mm et des déflexions de y = 16, 24, 256 µm.

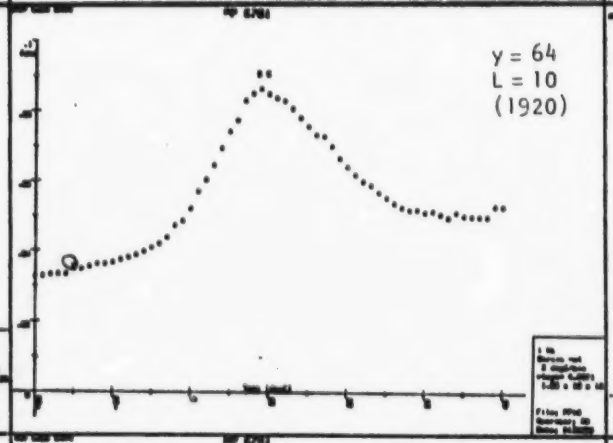
(la déformation "ε" (µ m/m) est inscrite entre parenthèses)

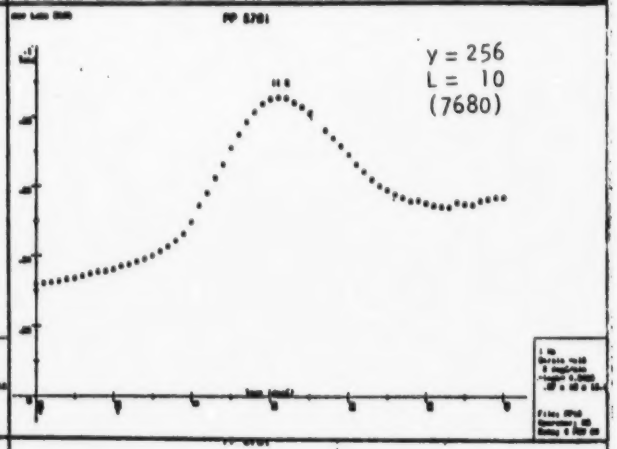


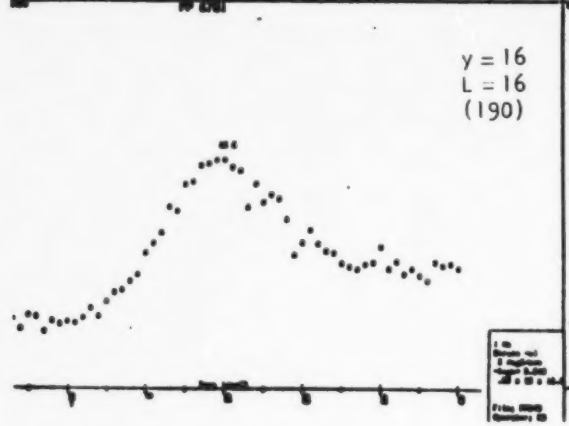
Graphes de tan (δ) pour des échantillons de 1,0 mm d'épaisseur pour des portées de L = 4, 10, 16 mm et des déflexions de y = 16, 64, 256 µm.

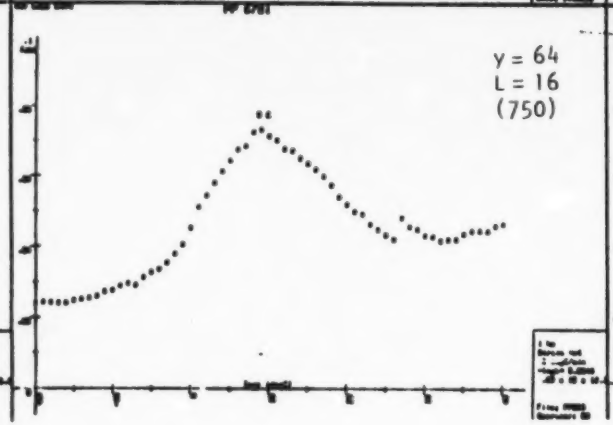
(la déformation "ε" (µ m/m) est inscrite entre parenthèses)

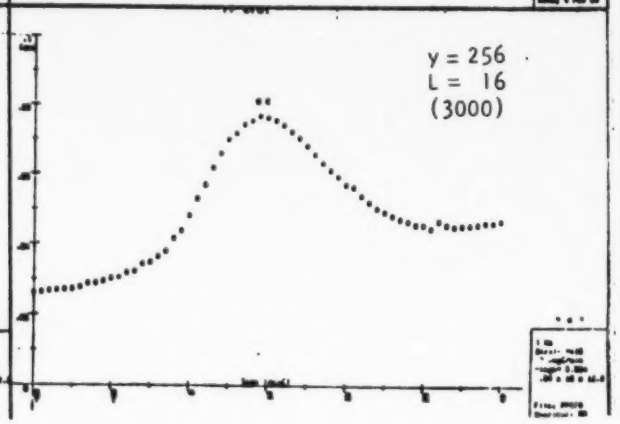


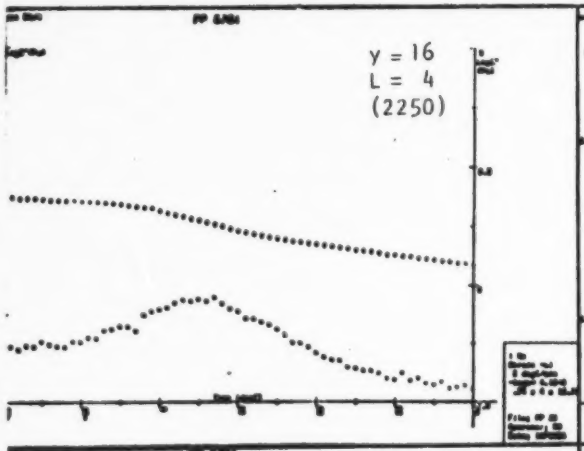


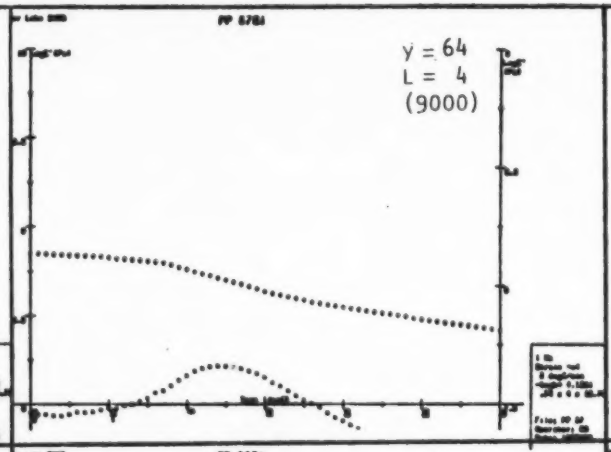






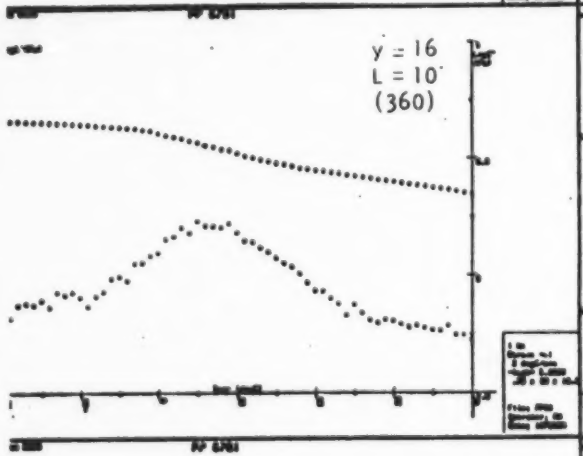


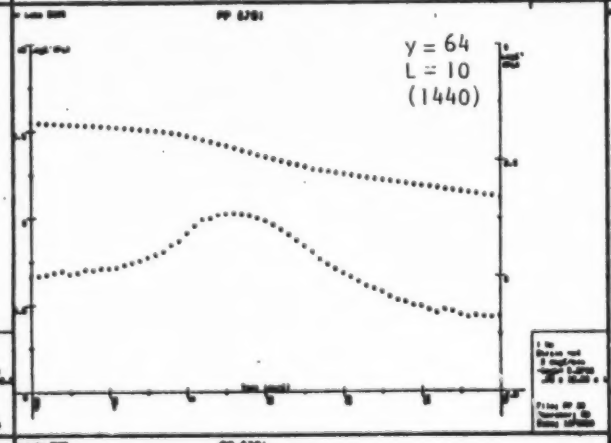


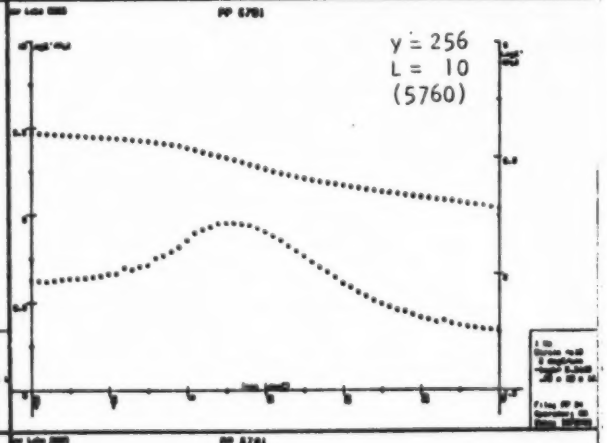


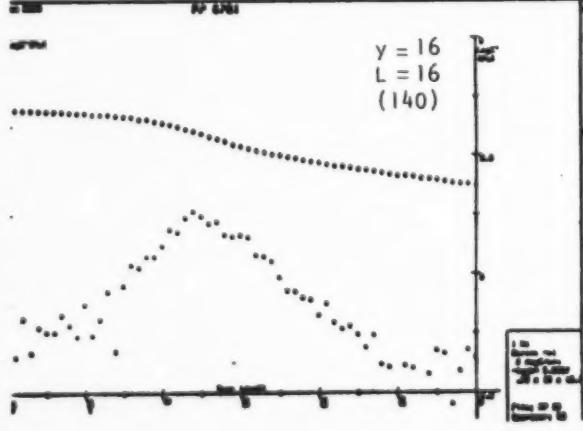
Graphes des modules dynamiques E' (au-dessus) et E'' (au-dessous) pour des échantillons de 0,75 mm d'épaisseur pour des portées de L = 4, 10, 16 mm et des déflexions de y = 16, 24, 256 µm.

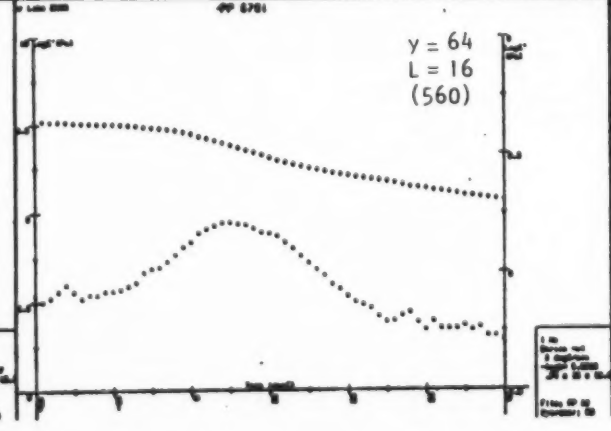
(la déformation "ε" (µ m/m) est inscrite entre parenthèses)

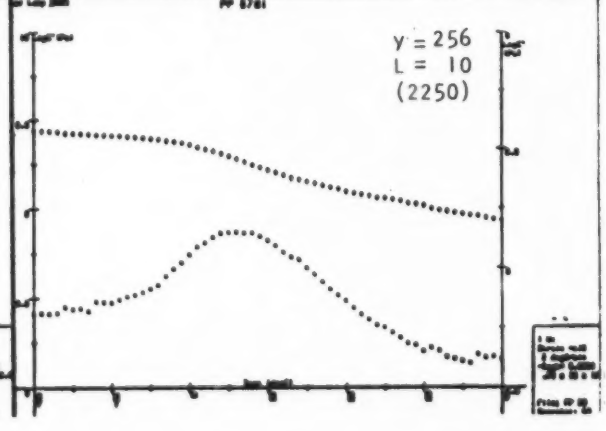


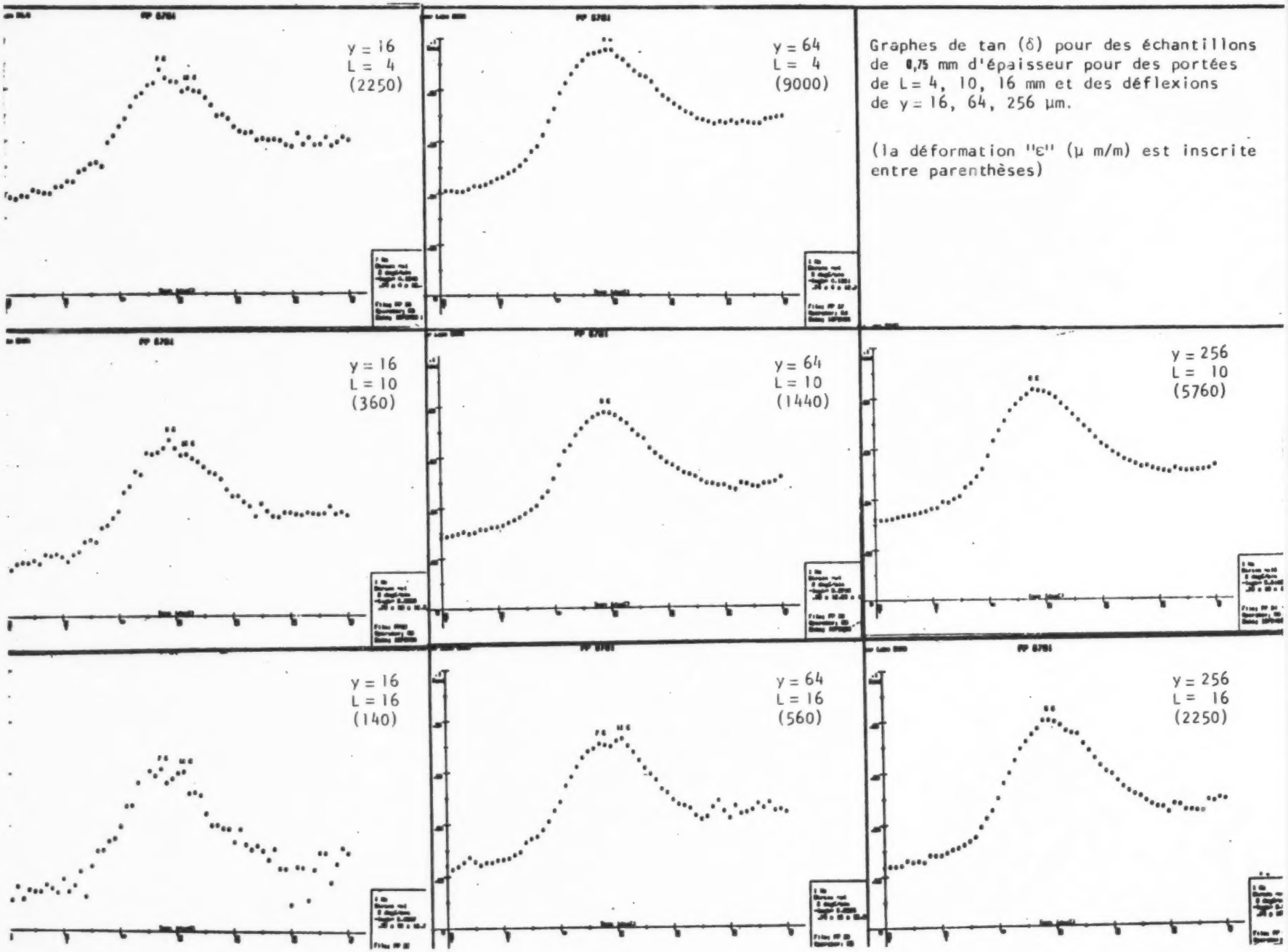






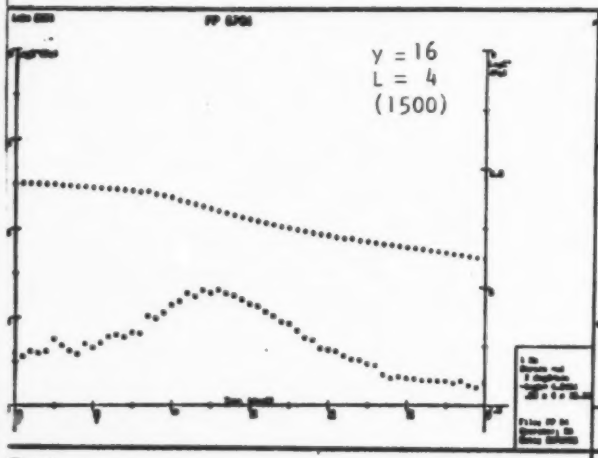


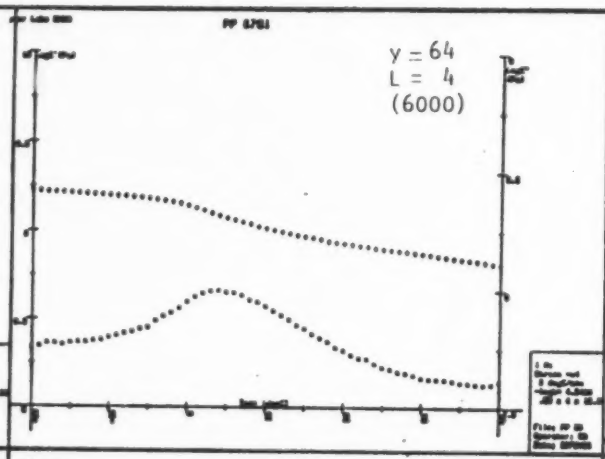




Graphes de tan (δ) pour des échantillons de 0,75 mm d'épaisseur pour des portées de L = 4, 10, 16 mm et des déflexions de y = 16, 64, 256 µm.

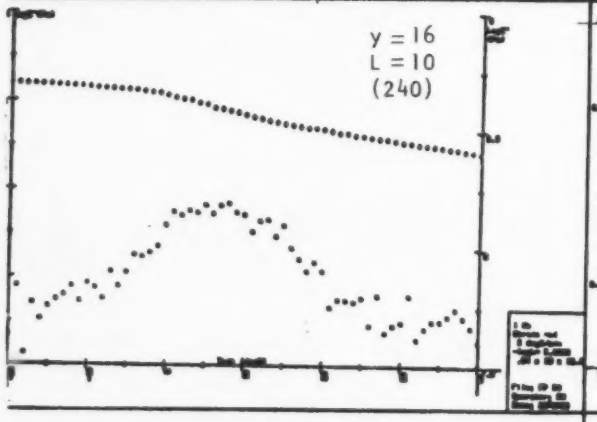
(la déformation "ε" (µ m/m) est inscrite entre parenthèses)

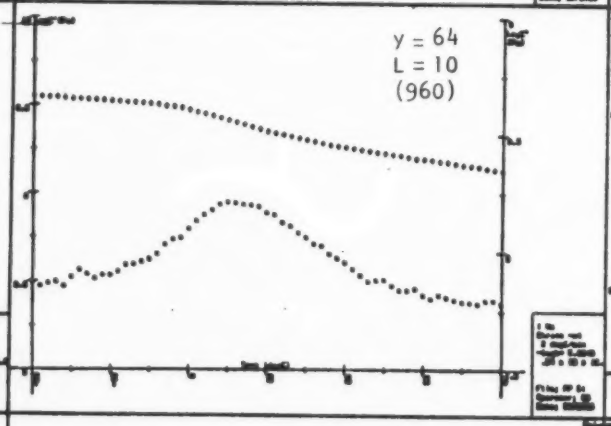


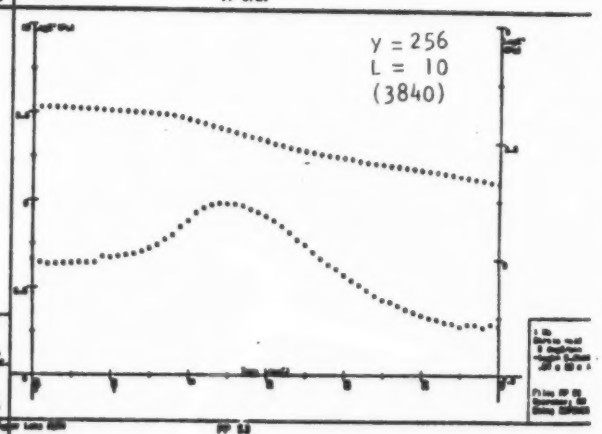


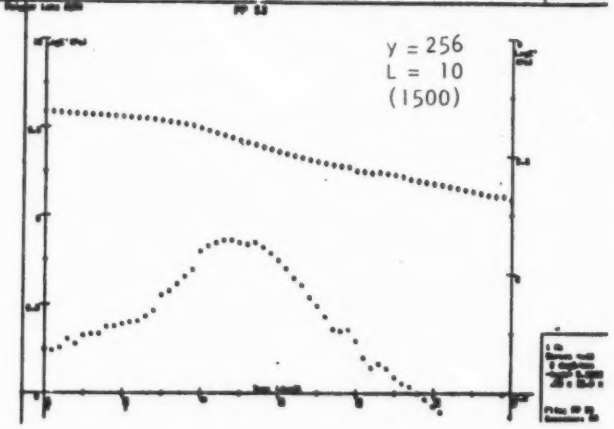
Graphes des modules dynamiques E' (au-dessus) et E'' (au-dessous) pour des échantillons de 0,5 mm d'épaisseur pour des portées de L = 4, 10, 16 mm et des déflexions de y = 16, 64, 256 µm.

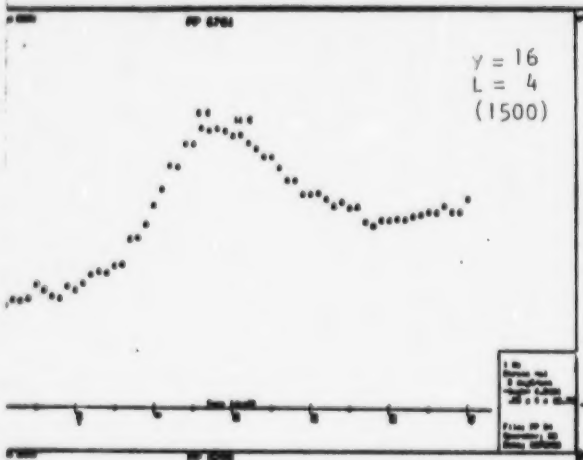
(la déformation "ε" (µ m/m) est inscrite entre parenthèses)

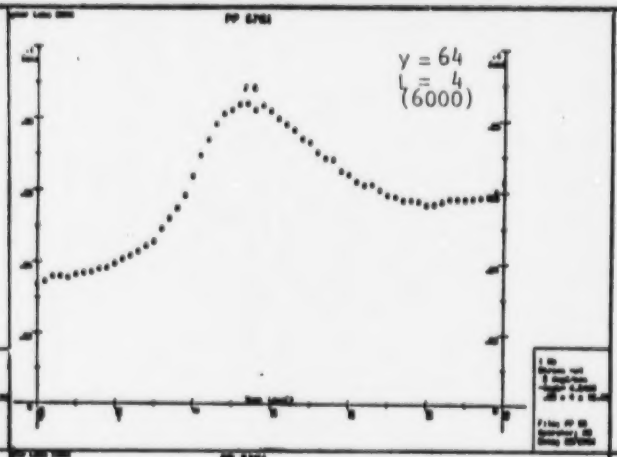






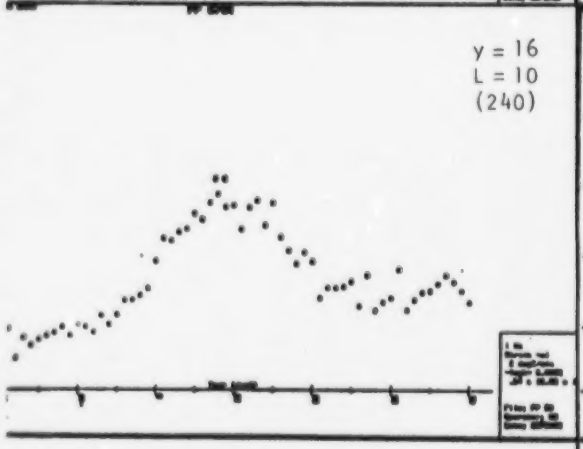


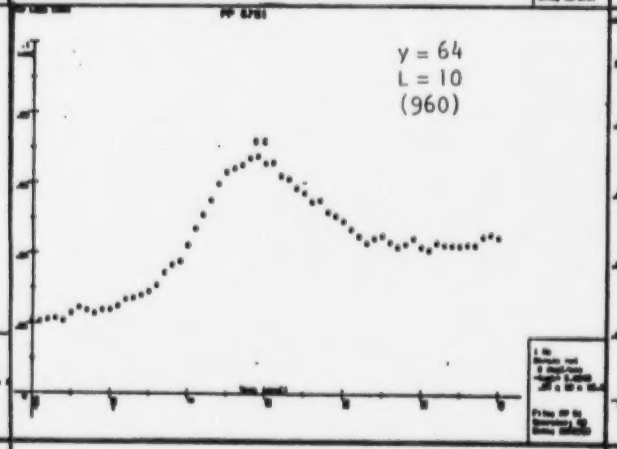


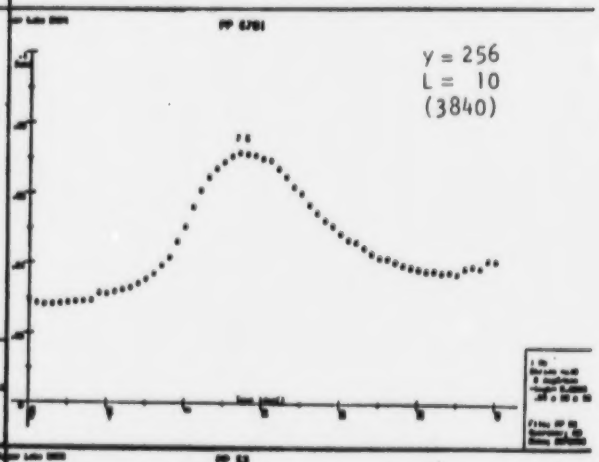


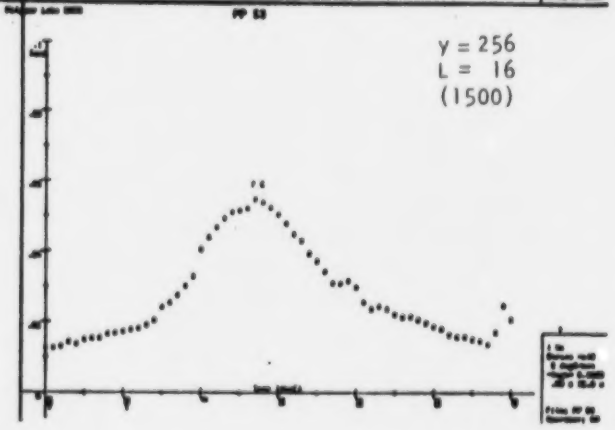
Graphes de tan (δ) pour des échantillons de 0,5 mm d'épaisseur pour des portées de L= 4, 10, 16 mm et des déflexions de y= 16, 64, 256 µm.

(la déformation "ε" (µ m/m) est inscrite entre parenthèses)









ANNEXE D

ANALYSE DES FLUCTUATIONS DES SIGNAUX DE L'AMORTISSEMENT

- Analyse des fluctuations des signaux de l'amortissement

Les signaux de l'amortissement de la série de tests du chapitre 4 ont été étudiés . La notion de bruit a été définie comme étant la somme des écarts-types sur trois points consécutifs récoltés à la suite d'un essai (voir le programme écrit à cette fin ci-dessous) .

* programme

```
10 BRUIT=0
20 FOR J=2 TO Pmax-2
30      Moy=(loss(j-1) + loss(j) + loss(j+1))/3
40      BRUIT=BRUIT + (loss(j) - Moy)²
50 NEXT J
```

Définition des variables

BRUIT ..... variable représentant la fluctuation d'un signal

J ..... compteur

loss(j) ..... vecteur contenant tous les points obtenus de l'expérience

Moy ..... moyenne

Pmax ..... nombre de points que contient le vecteur loss(j)

Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous . La variable " bruit " calculée à partir des résultats des essais du chapitre 4 est inscrite pour chacune des conditions d'essais . Ces valeurs sont ensuite reprises sous forme de graphique pour chaque épaisseur d'échantillons.

** e=1 mm DEPLACEMENT(µm)

portée (mm)	16	64	256
4.	5191	493	----
10.	9921	1096	454
16.	25875	----	1289

** e=0.5 mm

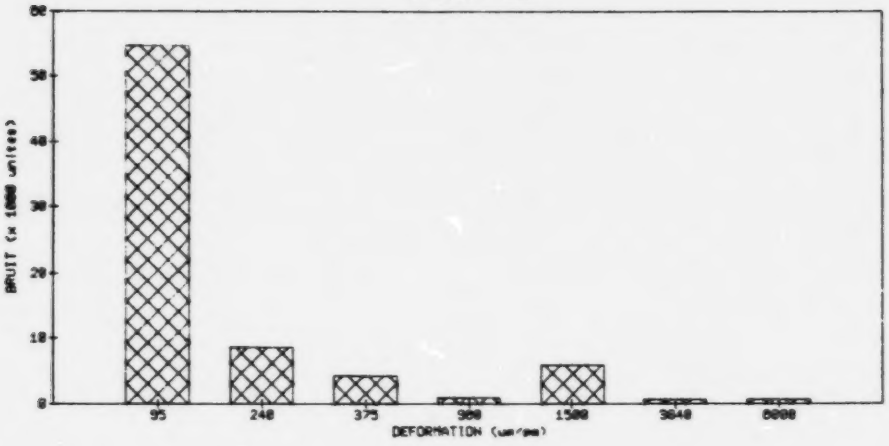
portée (mm)	16	64	256
	9795	725	----
	8534	905	691
	54836	4125	2006

** e=0.75 mm

16	64	256
6215	929	----
39606	2170	642
----	----	3447

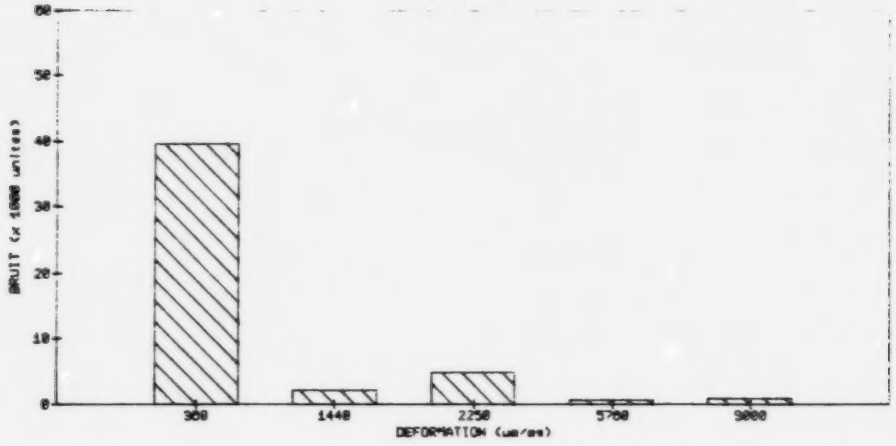
BRUIT vs DEFORMATION

e=0.5 mm



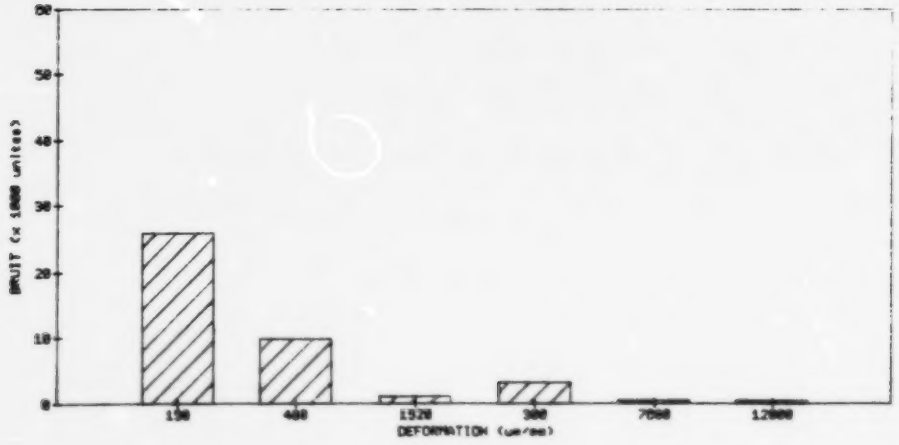
BRUIT vs DEFORMATION

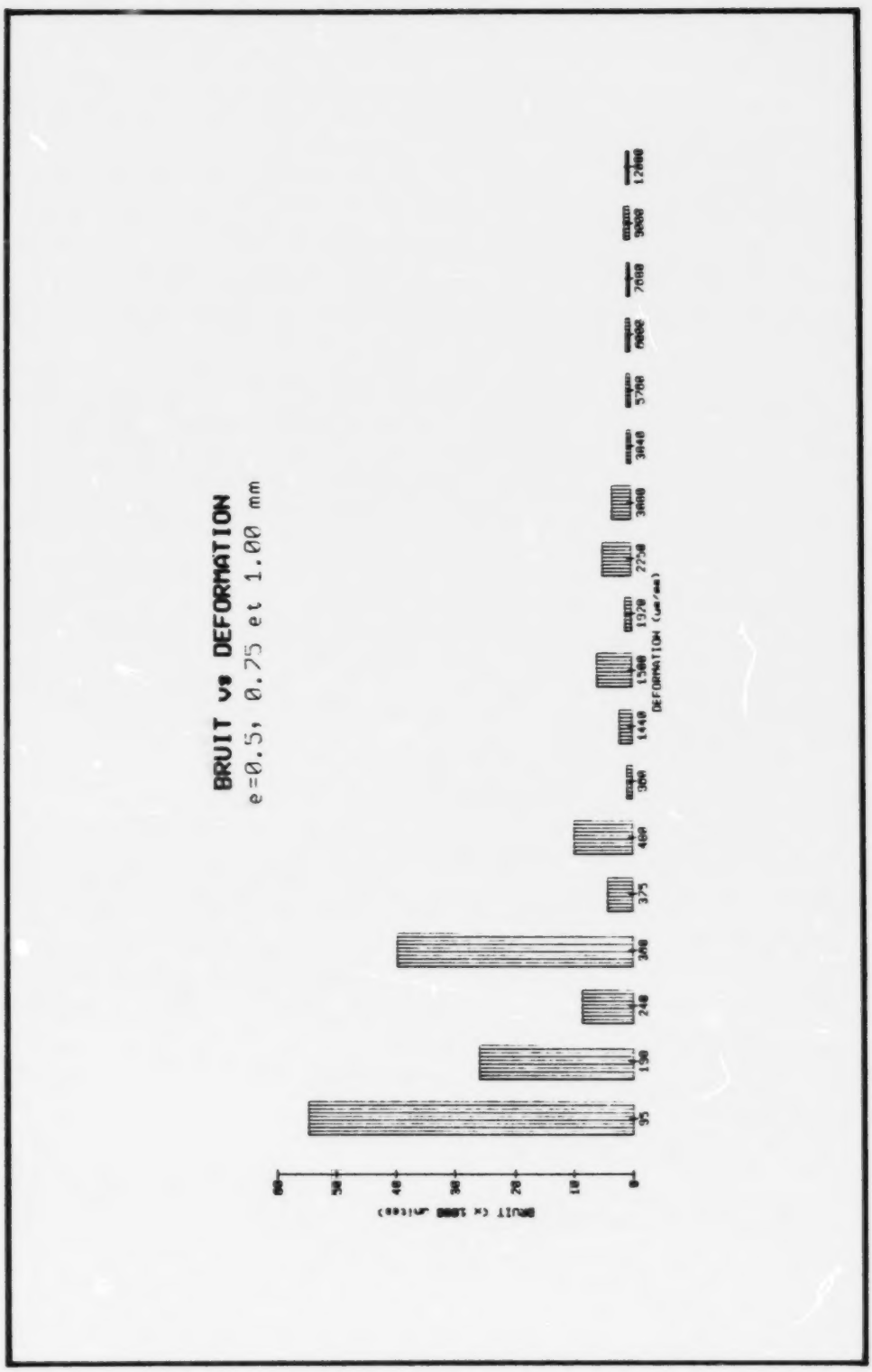
e=0.75 mm



BRUIT vs DEFORMATION

e=1.00 mm




BRUIT vs DEFORMATION
e=0.5, 0.75 et 1.00 mm
BRUIT (x 1000 unités)
DEFORMATION (µm/m)
0
10
20
30
40
50
60
95
150
240
300
375
480
300
1440
1500
1920
2250
3000
3840
5760
7680
9600
12000